

REGIONE
SICILIANA



COMUNE DI
SALEMI



COMUNE DI
MARSALA



Il Committente:

NP Sicilia 2

NP Sicilia 2 S.r.l.

Via San Marco, 21
20121 MILANO
P.IVA - C.F. 12844470968

Il Progettista:



dott. ing. VITTORIO RANDAZZO



dott. ing. VINCENZO DI MARCO



Titolo del progetto:

PARCO EOLICO "CELSO-PESCES"
POTENZA NOMINALE 39,6 MW

Elaborato:

PROGETTO DEFINITIVO

Codice Elaborato:

NPS2_SAL_D15_REL

TITOLO ELABORATO:

Calcolo gittata massima e ribaltamento

FOGLIO:

SCALA:

FORMATO:

A4

Rev:	Data	Descrizione Revisione	Redatto	Controllato	Approvato
0			G.Z.	V.D.	V.R.

	PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 2

INDICE

1	PREMESSA	3
2	FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE	4
3	CARATTERISTICHE AEROGENERATORE	6
4	ROTTURA DELLA PALA	7
4.1	FATTORI CHE INFLUENZANO LA GITTATA	8
4.2	MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO	9
4.3	ROTTURA ALLA RADICE DELLA PALA	11
4.4	CALCOLO GITTATA AEROGENERATORE	16
4.5	FRAMMENTO DI PALA	20
4.6	MASSIMA GITTATA DEL FRAMMENTO DI PALA	22
5	RIBALTAMENTO TORRE EOLICA	22
6	CONCLUSIONI	24

	PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 3

1 PREMESSA

Su incarico di NP Sicilia 2 s.r.l., la società AGON Engineering S.r.l. ha redatto il progetto definitivo relativo alla realizzazione di un impianto eolico nei comuni di Salemi (TP) e Marsala (TP).

Il progetto prevede l'installazione di n. 6 nuovi aerogeneratori con potenza unitaria di 6,6 MW, per una potenza complessiva di impianto pari a 39,6 MW. All'impianto verrà altresì affiancato un sistema di storage avente una potenza nominale pari a 13,4 MW, corrispondente a una capacità di accumulo di ca. 54 MWh.

Nel dettaglio, tutti gli aerogeneratori ricadono all'interno del territorio afferente al comune di Salemi (TP), mentre la viabilità di esercizio, il cavidotto di collegamento alla rete elettrica nazionale, interesseranno sia il comune di Salemi (TP) sia quello di Marsala (TP).

Nel territorio comunale di Salemi (TP) sarà realizzata una Stazione Utente (SU), dove giungeranno i cavidotti provenienti sia dal parco eolico, sia dall'impianto di storage in oggetto, e dalla quale partirà una doppia terna che verrà collegata alla RTN (Rete Trasmissione Nazionale) in antenna a 36 kV previa realizzazione di una nuova stazione elettrica di trasformazione (SE) a 220/36 kV della RTN, inserita in entra - esce sulla linea RTN a 220 kV “Fulgatore - Partanna”, nel territorio comunale di Marsala (TP).

La presente relazione costituisce lo studio della distanza massima raggiungibile dalla rottura di una pala o di un frammento di essa (gittata massima).

In qualsiasi caso, la gittata massima e la velocità all'impatto sono dei fattori determinanti per la stima del rischio. La gittata massima dipende dal prodotto “raggio della pala x velocità di rotazione”. Il calcolo presenta alcune complessità in quanto le variabili in gioco sono numerose ed il risultato può essere soltanto di tipo probabilistico in quanto legato alle modalità ed al momento del distacco. Infatti, un corpo lanciato in aria in presenza di forte vento potrebbe dar luogo ad effetti di “portanza” che possono prolungare i tempi di volo. L'effetto viscoso dell'aria, d'altra parte, ha un effetto opposto frenando il corpo stesso.

	<p align="center">PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”</p>			
	<p align="center">CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO</p>	<p>29/05/2023</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 4</p>

2 FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

Le pale di un aerogeneratore, fissate su un mozzo, costituiscono nel complesso il rotore. Nell'aerogeneratore è presente un sistema di controllo aerodinamico, chiamato imbardata, che permette il controllo della potenza ruotando le pale intorno al loro asse principale, modificando l'orientamento rispetto alla direzione del vento, per sempre il medesimo profilo alare garantendo, a prescindere dalla direzione del vento, un verso orario di rotazione.

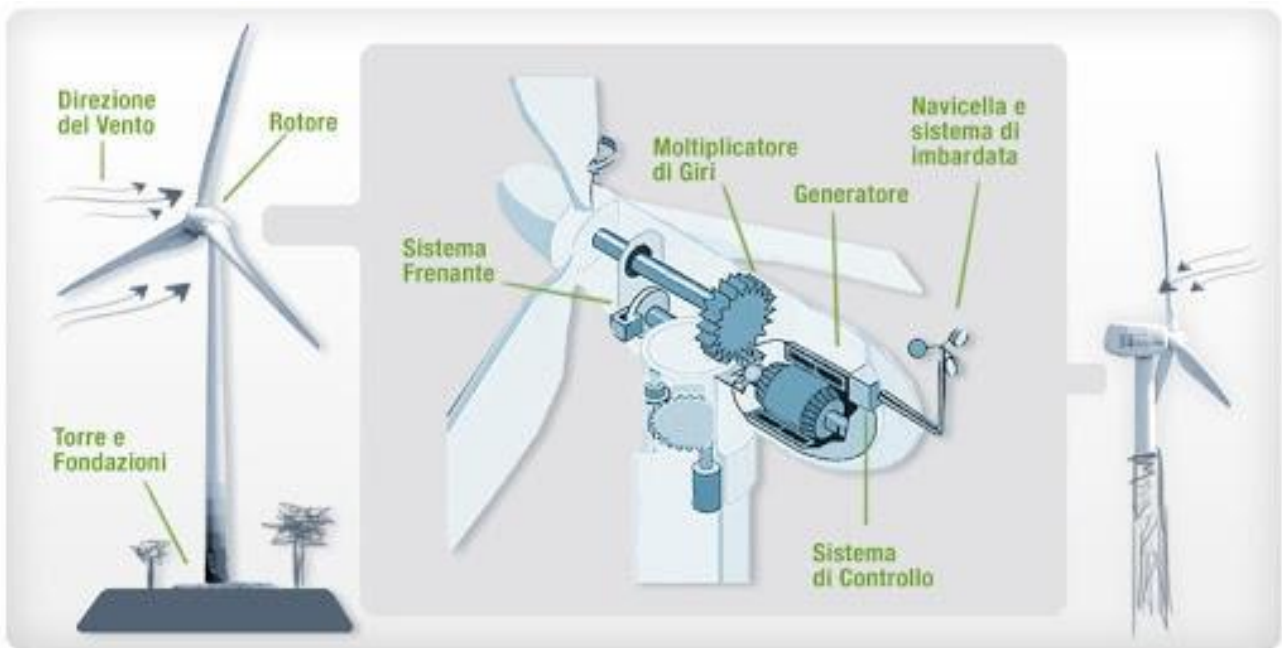


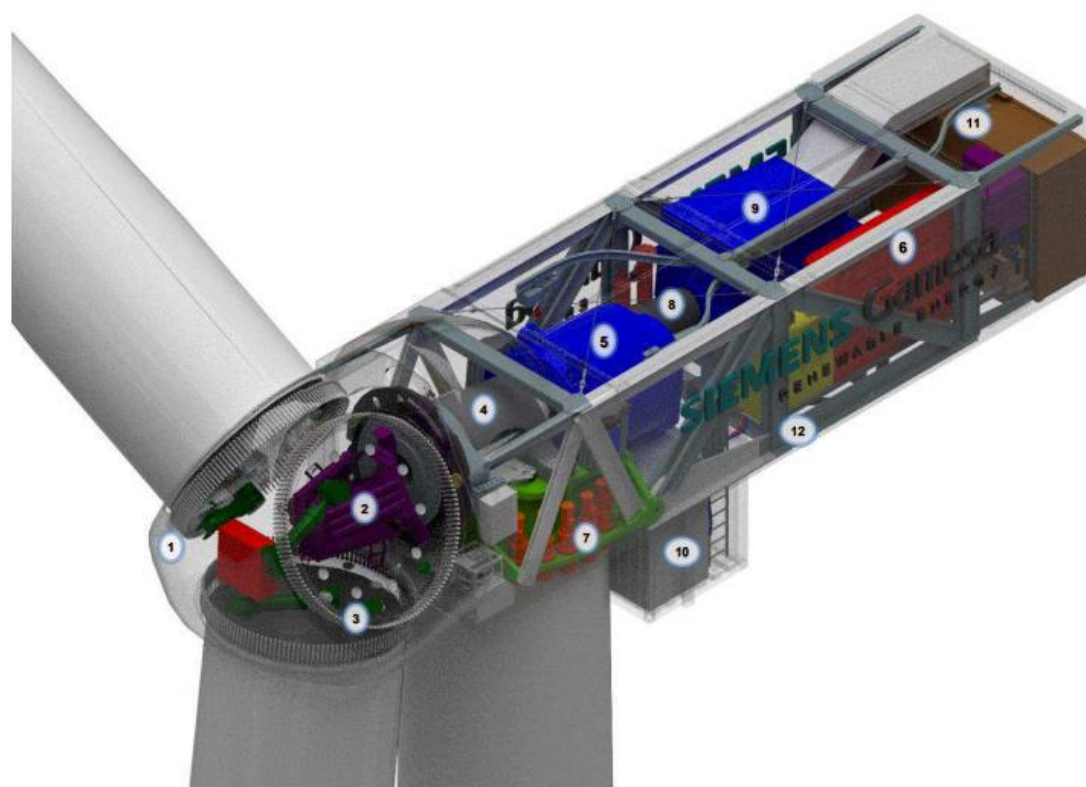
Figura 1- Relazione tra direzione del vento e rotazione delle pale.

Questa considerazione serve per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale e a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano.

Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva che individua la direzione del moto del corpo che si distacca. Mettendo in relazione tale traiettoria con la

corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può rappresentare un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.

La navicella dell'aerogeneratore da un punto di vista meccanico si presenta come segue:



- | | |
|-----------------------|--------------------|
| 1 Hub | 7 Yaw system |
| 2 Pitch system | 8 High speed shaft |
| 3 Blade bearings | 9 Generator |
| 4 Low speed shaft | 10 Transformer |
| 5 Gearbox | 11 Cooling system |
| 6 Electrical cabinets | 12 Rear Structure |

Figura 2- Tipico Aerogeneratore

	PARCO EOLICO "CELSO-PESCES"	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 6



3 CARATTERISTICHE AEROGENERATORE

Le macchine impiegate nel parco e quindi soggette ad una attenta analisi avranno le seguenti caratteristiche:

ROTORE	
diametro	170 m
velocità di rotazione da scheda tecnica	8,83 rpm
numero pale	3

TORRE	
tipo	tubolare
struttura	sezioni collegate tramite flangiatura
altezza	115 m

FUNZIONAMENTO	
cut out	25 m/s (velocità del rotore gradualmente ridotta)
Potenza	6,6 MW

	PARCO EOLICO "CELSO-PESCES"	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 7

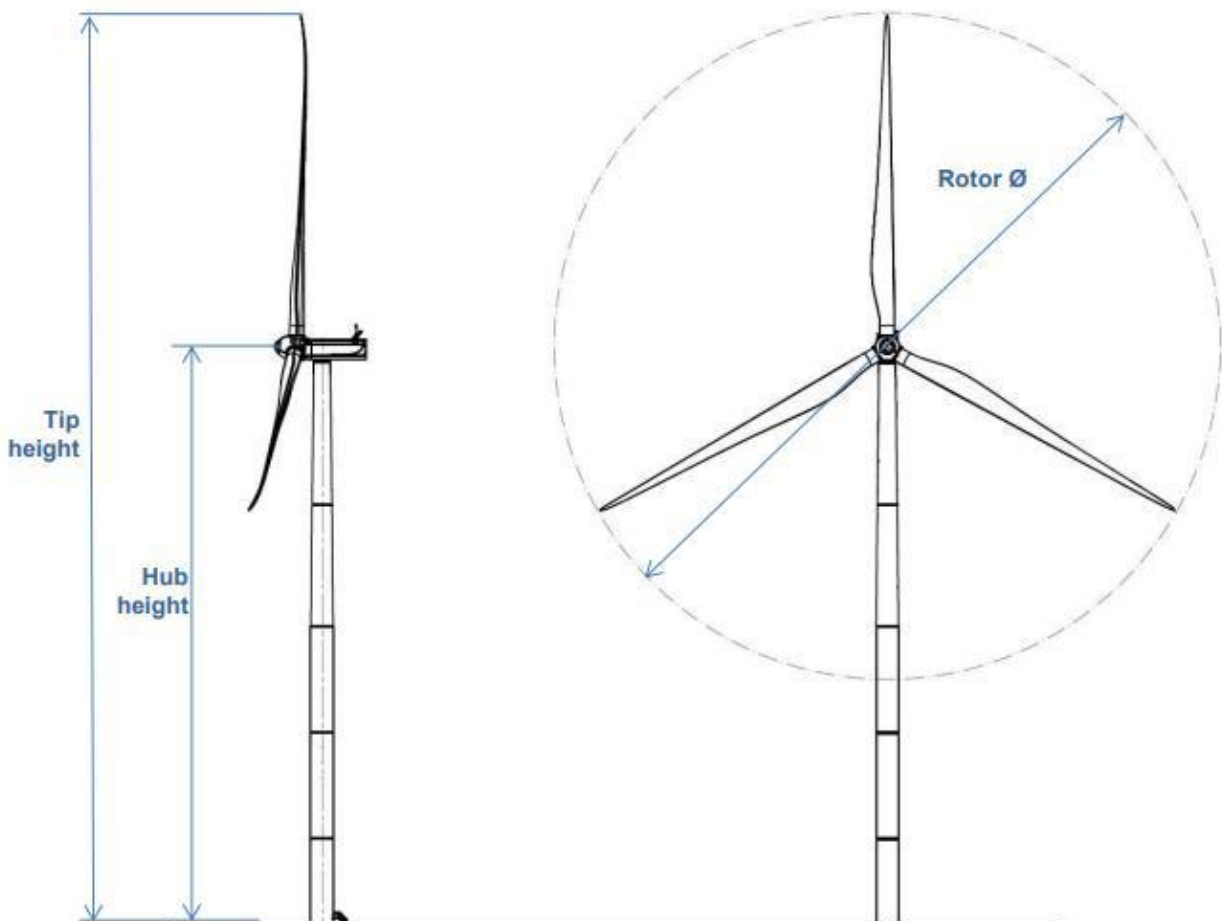


Figura 3- Vista complessiva Aerogeneratore

4 ROTTURA DELLA PALA

Le modalità di rottura della pala possono essere assai diverse. Essendo un organo in rotazione è soggetto alla forza centripeta che va equilibrata con l'azione della struttura della torre stessa. Per minimizzare tale forza, la pala è costruita in materiale leggero; normalmente si utilizzano materiali compositi che sfruttano le caratteristiche meccaniche così da far fronte ai carichi aerodinamici imposti.

	PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 8

Le modalità di rottura sono classificabili in due gruppi:

- Rottura alla radice;
- Rottura di frammento.

4.1 FATTORI CHE INFLUENZANO LA GITTATA



Da un punto di vista teorico, non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore della pala (o sezione di pala distaccata), si avrebbe nel caso di distaccamento in corrispondenza della posizione palare pari a 45 gradi e di moto a “giavellotto” del frammento. Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale che il verificarsi di un moto a giavellotto risulta praticamente impossibile: le forze di resistenza viscosa, le azioni resistive del vento ed il moto di rotazione complesso dovuto al profilo aerodinamico della pala/frammento-di-pala, si oppongono infatti al moto e riducono il tempo e la distanza di volo.

La traiettoria iniziale della pala/sezione-di-pala distaccata è determinata specialmente dall'angolo in corrispondenza del quale avviene il distacco e dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia. Per quanto riguarda le forze di tipo aerodinamico e relativi momenti, queste agiranno sulla pala/sezione-di-pala influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

Distanza percorsa

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

- dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco;
- dalla velocità del vento nel momento del distacco;
- dalle forze di attrito che agiscono sulla pala/sezione-di-pala in volo;

	PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 9

➤ dal tempo di volo.

Il tempo di volo generalmente è determinato:

- dalla componente verticale della velocità iniziale posseduta dalla pala/sezione di pala subito dopo il distacco, in corrispondenza del suo baricentrico;
- dalla posizione rispetto al suolo;
- dall'accelerazione verticale;
- dalle forze di attrito agenti sulla pala/sezione di pala stessa.

Il tempo di volo desumibile da tali considerazioni è utilizzato successivamente per il calcolo della distanza.

4.2 MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO

Il moto reale della parte distaccata risulta alquanto complesso, poiché dipendente, dalle caratteristiche aerodinamiche di questa e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala). I casi puramente teorici di rottura e di volo con moto “a giavellotto” sono da ritenere, appunto poco realistici data la complessità aerodinamica della pala e la presenza dell'azione del vento.

Il modello teorico che meglio caratterizza il moto delle parti (siano esse sezioni di pala e la pala intera) che hanno subito il distacco, e che più si avvicina al caso reale, è il Moto Rotazionale Complesso, che permette di studiare il moto nel suo insieme, considerando i moti di rotazione intorno agli assi xx , yy , zz .

	PARCO EOLICO "CELSO-PESCES"	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 10

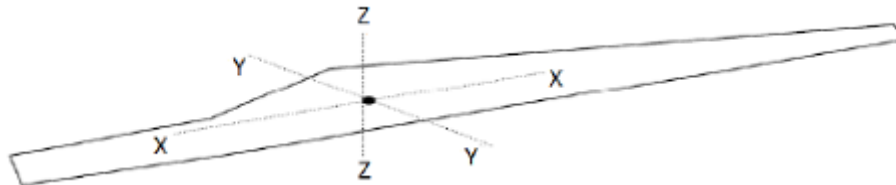


Figura 4-Assi ortogonali della pala

La rotazione della pala intorno all'asse zz è causata dalla conservazione del momento della quantità di moto: in caso di rottura, per il principio di conservazione, il generico frammento tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano. La rotazione intorno agli altri assi è dovuta alle azioni indotte dal vento incidente out of plane sulla pala/sezione di pala. In particolare, si genera:

- un momento intorno all'asse xx : centro di massa della sezione di pala lungo la corda e il centro aerodinamico non coincidono.
- un momento intorno all'asse yy : centro di massa e centro aerodinamico della pala/sezione di pala non coincidono;

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di distacco/lancio e dalle forze inerziali che agiscono sulla pala/frammento di pala: al momento del distacco, oltre all'impulso, agiscono anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise. Pertanto, il moto della parte distaccata sarà un moto rotazionale, su cui agisce anche la forza di gravità.

La resistenza offerta dalla pala al moto sia in plane che out plane è generata dalla rotazione intorno agli assi xx e yy .

La massima gittata della pala/frammento di pala è strettamente dipendente:

- dal peso del frammento (per un frammento leggero il moto è limitato dalle forze di attrito viscoso);
- dal profilo aerodinamico della pala/frammento di pala;
- dalla posizione della pala nel momento del distacco;

	<p align="center">PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”</p>			
	<p align="center">CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO</p>	<p align="center">29/05/2023</p>	<p align="center">REV.0</p>	<p align="center">Pag. 11</p>

- dal numero di giri del rotore e quindi dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;
- dalla dimensione del frammento.

Possiamo quindi concludere che:


- effettuando un calcolo che tenga conto dei valori cinematici e geometrici del moto senza considerare gli effetti viscosi e la complessità del moto rotazionale si ottengono valori di gittata più alti di quelli reali (valore teorico > valore reale);
- i valori della gittata sono intrinsecamente dipendenti dalla velocità di rotazione piuttosto che dalle dimensioni dell'aerogeneratore e dell'altezza della torre.

4.3 ROTTURA ALLA RADICE DELLA PALA

La rottura della pala alla radice risulta un evento più probabile (rispetto al numero di rotture totali) in quanto la sezione di attacco risulta assai “critica” dal punto di vista strutturale.



Figura 5- Esempio di rottura alla radice

	PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 12



Le cause sono principalmente due:

- La rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo. Il longherone è infatti dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni serrati opportunamente durante l'installazione della turbina.
- La discontinuità della struttura che passa da un carico distribuito sulle fibre alla flangia di attacco crea delle concentrazioni tensionali che con l'andare del tempo possono creare problemi di affaticamento con conseguente rottura. I costruttori consapevoli del problema, negli ultimi anni hanno introdotto diversi accorgimenti con l'intento di migliorare le prestazioni.

Il precarico conferito ai bulloni durante il serraggio influisce in maniera determinante sulla resistenza dei bulloni stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina. L'errata verifica del serraggio ed una riduzione del precarico possono determinare la rottura per fatica dei bulloni e di conseguenza il possibile distacco della pala.

Per la stima della gittata massima dell'intera pala si impongono alcune ipotesi semplificative:

- distacco alla rotazione di funzionamento massima;
- vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
- distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;
- una diminuzione del tempo di volo anche del 20% a causa degli effetti di attrito;
- assenza di effetti di “portanza” del profilo alare;
- baricentro posizionato ad 1/3 della lunghezza della pala;

	PARCO EOLICO "CELSO-PESCES"	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 13

- assenza di attriti viscosi durante il volo: questa ipotesi risulta conservativa
- distacco in corrispondenza di un angolo di 315° rispetto alla verticale, che dal punto di vista teorico garantisce la massima gittata (moto in senso orario).

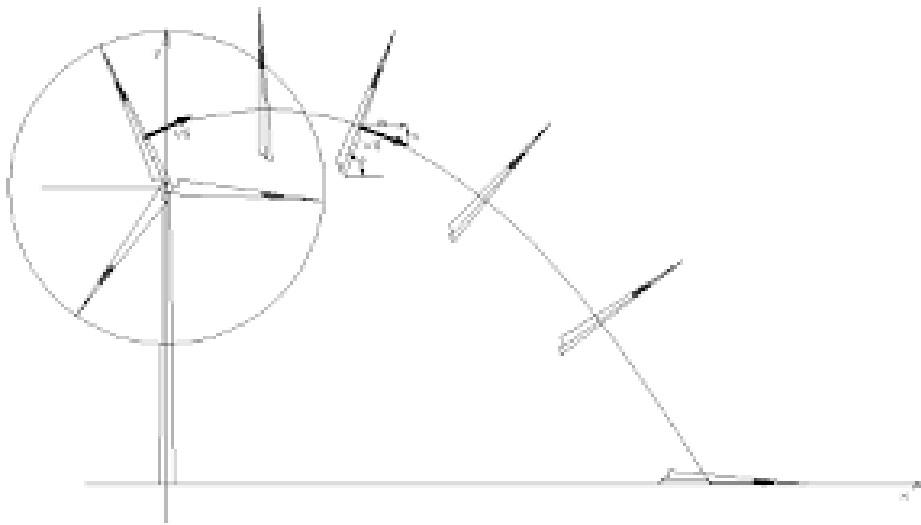


Figura 6- Traiettoria della pala

Equazioni del moto applicate:

Le equazioni del moto di un punto materiale soggetto solo alla forza di gravità sono

$$x' = 0$$

$$y' = -g$$

dove $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità.

La legge del moto, soluzione di queste equazioni è:

$$x(t) = x_0 + v_x t$$

$$y(t) = y_0 + v_y t + 1/2 g t^2$$

dove $(x_0 ; y_0)$, è la posizione iniziale del punto materiale e $(v_x ; v_y)$ è la sua velocità.

	PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 14

La velocità V_0 ha due componenti:

$$v_x = V_0 \cos \theta$$

$$v_y = V_0 \sin \theta$$

La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo T tale che $Y(T) = 0$; dalla legge del moto si ottiene:

$$T = v_y/g + 1/g \sqrt{(v_y^2 + 2y_0g)}$$

scartando la soluzione corrispondente a tempi negativi.

Considerando il moto bidimensionale dell'elemento rotante, come il moto di un punto materiale concentrato nel baricentro, tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento. Chiamiamo con n il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare. Tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a 2π radianti, per n giri otteniamo $2\pi n$ radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare ω del corpo in movimento. Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \left[\frac{rad}{sec} \right]$$

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ad una distanza dal centro di rotazione pari a circa $r_g = 28,33 \text{ m}$ essendo il diametro del rotore $D = 170 \text{ m}$ ed il raggio di ciascuna pala $R = 85,0 \text{ m}$ circa.

	PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 15

Per determinare la velocità del baricentro della pala basta moltiplicare la distanza del baricentro dal centro di rotazione per la velocità angolare. Il numero di giri valutato per questa analisi è pari a 8,83 giri/minuto.

Per questo valore di velocità angolare, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$V_g = \omega r_g = (2\pi n/60) r_g = 31,45 \text{ m/sec}$$

Per tenere conto degli effetti di attrito dell'area, tale valore viene ridotto in fase di calcolo di un'aliquota pari al 10%, pertanto la V_g di calcolo sarà pari a $V_{g,calc} = 28,31 \text{ m/s}$. La posizione e la velocità iniziale sono determinati, oltre che dalla velocità tangenziale appena calcolata, anche dall'angolo θ della pala al momento del distacco.

Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$x_0 = -r_g \cos(\vartheta);$$

$$y_0 = H + r_g \sin(\vartheta);$$

$$v_x = V_g \sin(\vartheta);$$

$$v_y = V_g \cos(\vartheta).$$

La gittata L è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo della pala; l'altezza H è l'altezza del mozzo della torre (115 m). Dalla legge del moto otteniamo:

$$L = X(t)$$

Sostituendo l'espressione ricavata per T , otteniamo la gittata L in termini di V_g e di ϑ :

$$G_{max} = \frac{v_{x0} * \left(v_{y0} + \sqrt{v_{y0}^2 + 2(g * y_0)} \right)}{g} - x_0$$

	PARCO EOLICO "CELSO-PESCES"	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 16

4.4 CALCOLO GITTATA AEROGENERATORE

L'applicazione delle formule sopra descritte porta alla determinazione del valore di gittata massima.

Dati di input:

$$V_{g,calc} = 28,31 \text{ m/s};$$

$$r_g = 28,33 \text{ m};$$

$$g = 9.81 \text{ m/s};$$

$$H = 115 \text{ m}.$$

Il valore della gittata dipenderà dall'angolo ϑ .

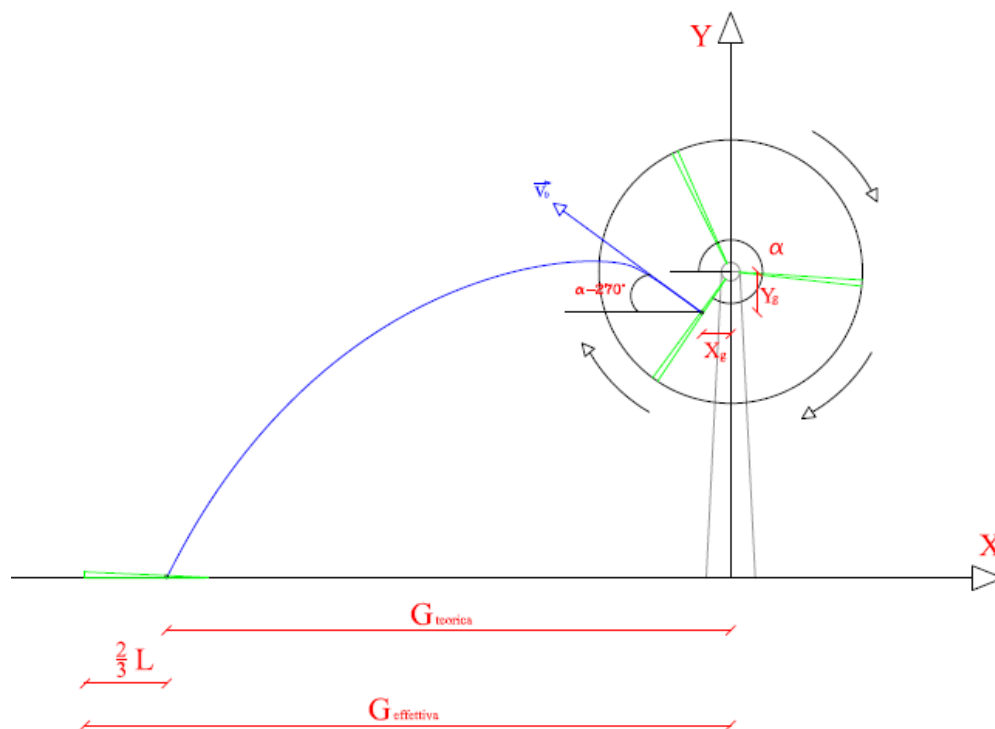


Figura 7- Rappresentazione grafica della gittata

	PARCO EOLICO "CELSO-PESCES"		 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO		29/05/2023	REV.0	Pag. 17

Si noti che fissato un generico angolo ϑ , la gittata aumenta quadraticamente con V_g salvo i casi particolari $\vartheta=\pm 90^\circ$, $\vartheta=0^\circ$, $\vartheta=180^\circ$, nei quali la gittata aumenta linearmente con V oppure è pari a r_g .

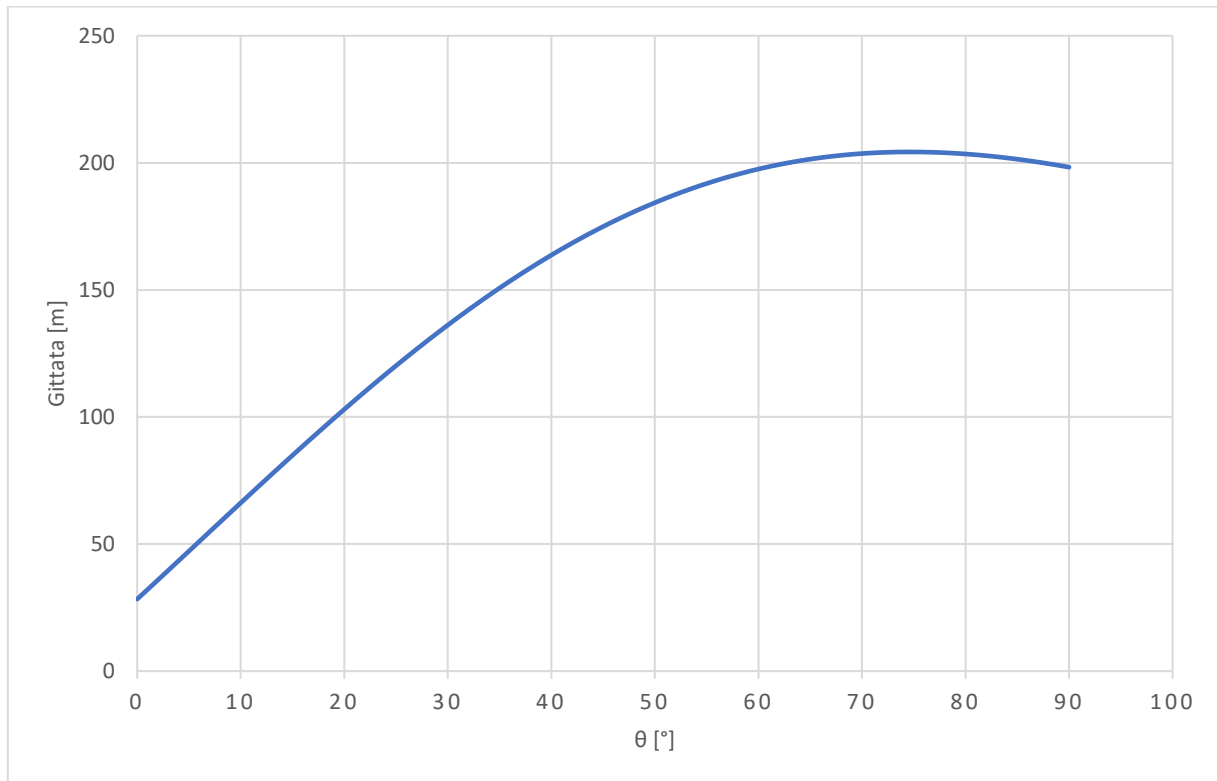
Angolo α	n	L	H _{torre}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
0	8,83	85,00	115,00	26,20	0,00	26,20	115,00	170	28,33	9,81	-28,33	28,33	56,67	28,33
1	8,83	85,00	115,00	26,20	0,46	26,20	115,49	170	28,33	9,81	-24,58	28,33	56,67	32,09
2	8,83	85,00	115,00	26,20	0,91	26,18	115,99	170	28,33	9,81	-20,80	28,32	56,67	35,86
3	8,83	85,00	115,00	26,20	1,37	26,16	116,48	170	28,33	9,81	-17,02	28,29	56,67	39,65
4	8,83	85,00	115,00	26,20	1,83	26,14	116,98	170	28,33	9,81	-13,23	28,26	56,67	43,44
5	8,83	85,00	115,00	26,20	2,28	26,10	117,47	170	28,33	9,81	-9,43	28,23	56,67	47,24
6	8,83	85,00	115,00	26,20	2,74	26,06	117,96	170	28,33	9,81	-5,63	28,18	56,67	51,04
7	8,83	85,00	115,00	26,20	3,19	26,00	118,45	170	28,33	9,81	-1,83	28,12	56,67	54,84
8	8,83	85,00	115,00	26,20	3,65	25,94	118,94	170	28,33	9,81	1,97	28,06	56,67	58,63
9	8,83	85,00	115,00	26,20	4,10	25,88	119,43	170	28,33	9,81	5,76	27,98	56,67	62,42
10	8,83	85,00	115,00	26,20	4,55	25,80	119,92	170	28,33	9,81	9,54	27,90	56,67	66,21
11	8,83	85,00	115,00	26,20	5,00	25,72	120,41	170	28,33	9,81	13,31	27,81	56,67	69,98
12	8,83	85,00	115,00	26,20	5,45	25,63	120,89	170	28,33	9,81	17,07	27,71	56,67	73,74
13	8,83	85,00	115,00	26,20	5,89	25,53	121,37	170	28,33	9,81	20,81	27,61	56,67	77,48
14	8,83	85,00	115,00	26,20	6,34	25,42	121,85	170	28,33	9,81	24,54	27,49	56,67	81,20
15	8,83	85,00	115,00	26,20	6,78	25,31	122,33	170	28,33	9,81	28,24	27,37	56,67	84,91
16	8,83	85,00	115,00	26,20	7,22	25,18	122,81	170	28,33	9,81	31,92	27,24	56,67	88,58
17	8,83	85,00	115,00	26,20	7,66	25,05	123,28	170	28,33	9,81	35,57	27,10	56,67	92,23

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
18	8,83	85,00	115,00	26,20	8,10	24,92	123,76	170	28,33	9,81	39,19	26,95	56,67	95,85
19	8,83	85,00	115,00	26,20	8,53	24,77	124,22	170	28,33	9,81	42,77	26,79	56,67	99,44
20	8,83	85,00	115,00	26,20	8,96	24,62	124,69	170	28,33	9,81	46,33	26,62	56,67	103,00
21	8,83	85,00	115,00	26,20	9,39	24,46	125,15	170	28,33	9,81	49,85	26,45	56,67	106,51
22	8,83	85,00	115,00	26,20	9,81	24,29	125,61	170	28,33	9,81	53,33	26,27	56,67	109,99
23	8,83	85,00	115,00	26,20	10,24	24,12	126,07	170	28,33	9,81	56,76	26,08	56,67	113,43
24	8,83	85,00	115,00	26,20	10,66	23,93	126,52	170	28,33	9,81	60,16	25,88	56,67	116,82
25	8,83	85,00	115,00	26,20	11,07	23,74	126,97	170	28,33	9,81	63,51	25,68	56,67	120,17
26	8,83	85,00	115,00	26,20	11,48	23,55	127,42	170	28,33	9,81	66,81	25,47	56,67	123,47
27	8,83	85,00	115,00	26,20	11,89	23,34	127,86	170	28,33	9,81	70,06	25,25	56,67	126,72
28	8,83	85,00	115,00	26,20	12,30	23,13	128,30	170	28,33	9,81	73,26	25,02	56,67	129,92
29	8,83	85,00	115,00	26,20	12,70	22,91	128,74	170	28,33	9,81	76,40	24,78	56,67	133,07
30	8,83	85,00	115,00	26,20	13,10	22,69	129,17	170	28,33	9,81	79,49	24,54	56,67	136,16
31	8,83	85,00	115,00	26,20	13,49	22,46	129,59	170	28,33	9,81	82,53	24,29	56,67	139,20
32	8,83	85,00	115,00	26,20	13,88	22,22	130,01	170	28,33	9,81	85,50	24,03	56,67	142,17
33	8,83	85,00	115,00	26,20	14,27	21,97	130,43	170	28,33	9,81	88,42	23,76	56,67	145,09
34	8,83	85,00	115,00	26,20	14,65	21,72	130,84	170	28,33	9,81	91,27	23,49	56,67	147,94
35	8,83	85,00	115,00	26,20	15,03	21,46	131,25	170	28,33	9,81	94,06	23,21	56,67	150,73
36	8,83	85,00	115,00	26,20	15,40	21,20	131,65	170	28,33	9,81	96,79	22,92	56,67	153,46
37	8,83	85,00	115,00	26,20	15,77	20,92	132,05	170	28,33	9,81	99,45	22,63	56,67	156,12
38	8,83	85,00	115,00	26,20	16,13	20,65	132,44	170	28,33	9,81	102,05	22,33	56,67	158,71
39	8,83	85,00	115,00	26,20	16,49	20,36	132,83	170	28,33	9,81	104,57	22,02	56,67	161,24
40	8,83	85,00	115,00	26,20	16,84	20,07	133,21	170	28,33	9,81	107,03	21,70	56,67	163,70
41	8,83	85,00	115,00	26,20	17,19	19,77	133,59	170	28,33	9,81	109,42	21,38	56,67	166,09
42	8,83	85,00	115,00	26,20	17,53	19,47	133,96	170	28,33	9,81	111,74	21,06	56,67	168,40
43	8,83	85,00	115,00	26,20	17,87	19,16	134,32	170	28,33	9,81	113,98	20,72	56,67	170,65
44	8,83	85,00	115,00	26,20	18,20	18,85	134,68	170	28,33	9,81	116,15	20,38	56,67	172,82
45	8,83	85,00	115,00	26,20	18,53	18,53	135,03	170	28,33	9,81	118,26	20,03	56,67	174,92
46	8,83	85,00	115,00	26,20	18,85	18,20	135,38	170	28,33	9,81	120,28	19,68	56,67	176,95

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
47	8,83	85,00	115,00	26,20	19,16	17,87	135,72	170	28,33	9,81	122,24	19,32	56,67	178,90
48	8,83	85,00	115,00	26,20	19,47	17,53	136,06	170	28,33	9,81	124,12	18,96	56,67	180,78
49	8,83	85,00	115,00	26,20	19,77	17,19	136,38	170	28,33	9,81	125,92	18,59	56,67	182,59
50	8,83	85,00	115,00	26,20	20,07	16,84	136,70	170	28,33	9,81	127,65	18,21	56,67	184,32
51	8,83	85,00	115,00	26,20	20,36	16,49	137,02	170	28,33	9,81	129,31	17,83	56,67	185,98
52	8,83	85,00	115,00	26,20	20,65	16,13	137,33	170	28,33	9,81	130,89	17,44	56,67	187,56
53	8,83	85,00	115,00	26,20	20,92	15,77	137,63	170	28,33	9,81	132,40	17,05	56,67	189,07
54	8,83	85,00	115,00	26,20	21,20	15,40	137,92	170	28,33	9,81	133,83	16,65	56,67	190,50
55	8,83	85,00	115,00	26,20	21,46	15,03	138,21	170	28,33	9,81	135,19	16,25	56,67	191,86
56	8,83	85,00	115,00	26,20	21,72	14,65	138,49	170	28,33	9,81	136,48	15,84	56,67	193,14
57	8,83	85,00	115,00	26,20	21,97	14,27	138,76	170	28,33	9,81	137,69	15,43	56,67	194,35
58	8,83	85,00	115,00	26,20	22,22	13,88	139,03	170	28,33	9,81	138,82	15,01	56,67	195,49
59	8,83	85,00	115,00	26,20	22,46	13,49	139,29	170	28,33	9,81	139,89	14,59	56,67	196,56
60	8,83	85,00	115,00	26,20	22,69	13,10	139,54	170	28,33	9,81	140,88	14,17	56,67	197,55
61	8,83	85,00	115,00	26,20	22,91	12,70	139,78	170	28,33	9,81	141,80	13,74	56,67	198,47
62	8,83	85,00	115,00	26,20	23,13	12,30	140,02	170	28,33	9,81	142,65	13,30	56,67	199,32
63	8,83	85,00	115,00	26,20	23,34	11,89	140,25	170	28,33	9,81	143,43	12,86	56,67	200,10
64	8,83	85,00	115,00	26,20	23,55	11,48	140,47	170	28,33	9,81	144,14	12,42	56,67	200,81
65	8,83	85,00	115,00	26,20	23,74	11,07	140,68	170	28,33	9,81	144,78	11,97	56,67	201,45
66	8,83	85,00	115,00	26,20	23,93	10,66	140,88	170	28,33	9,81	145,35	11,52	56,67	202,02
67	8,83	85,00	115,00	26,20	24,12	10,24	141,08	170	28,33	9,81	145,86	11,07	56,67	202,53
68	8,83	85,00	115,00	26,20	24,29	9,81	141,27	170	28,33	9,81	146,30	10,61	56,67	202,97
69	8,83	85,00	115,00	26,20	24,46	9,39	141,45	170	28,33	9,81	146,67	10,15	56,67	203,34
70	8,83	85,00	115,00	26,20	24,62	8,96	141,62	170	28,33	9,81	146,98	9,69	56,67	203,65
71	8,83	85,00	115,00	26,20	24,77	8,53	141,79	170	28,33	9,81	147,23	9,22	56,67	203,90
72	8,83	85,00	115,00	26,20	24,92	8,10	141,95	170	28,33	9,81	147,42	8,76	56,67	204,08
73	8,83	85,00	115,00	26,20	25,05	7,66	142,10	170	28,33	9,81	147,54	8,28	56,67	204,21
74	8,83	85,00	115,00	26,20	25,18	7,22	142,24	170	28,33	9,81	147,61	7,81	56,67	204,27
75	8,83	85,00	115,00	26,20	25,31	6,78	142,37	170	28,33	9,81	147,61	7,33	56,67	204,28

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
76	8,83	85,00	115,00	26,20	25,42	6,34	142,49	170	28,33	9,81	147,57	6,85	56,67	204,23
77	8,83	85,00	115,00	26,20	25,53	5,89	142,61	170	28,33	9,81	147,46	6,37	56,67	204,13
78	8,83	85,00	115,00	26,20	25,63	5,45	142,71	170	28,33	9,81	147,30	5,89	56,67	203,97
79	8,83	85,00	115,00	26,20	25,72	5,00	142,81	170	28,33	9,81	147,09	5,41	56,67	203,75
80	8,83	85,00	115,00	26,20	25,80	4,55	142,90	170	28,33	9,81	146,82	4,92	56,67	203,49
81	8,83	85,00	115,00	26,20	25,88	4,10	142,98	170	28,33	9,81	146,51	4,43	56,67	203,17
82	8,83	85,00	115,00	26,20	25,94	3,65	143,06	170	28,33	9,81	146,14	3,94	56,67	202,81
83	8,83	85,00	115,00	26,20	26,00	3,19	143,12	170	28,33	9,81	145,73	3,45	56,67	202,40
84	8,83	85,00	115,00	26,20	26,06	2,74	143,18	170	28,33	9,81	145,27	2,96	56,67	201,94
85	8,83	85,00	115,00	26,20	26,10	2,28	143,23	170	28,33	9,81	144,77	2,47	56,67	201,44
86	8,83	85,00	115,00	26,20	26,14	1,83	143,26	170	28,33	9,81	144,22	1,98	56,67	200,89
87	8,83	85,00	115,00	26,20	26,16	1,37	143,29	170	28,33	9,81	143,63	1,48	56,67	200,30
88	8,83	85,00	115,00	26,20	26,18	0,91	143,32	170	28,33	9,81	143,00	0,99	56,67	199,67
89	8,83	85,00	115,00	26,20	26,20	0,46	143,33	170	28,33	9,81	142,33	0,49	56,67	199,00
90	8,83	85,00	115,00	26,20	26,20	0,00	143,33	170	28,33	9,81	141,63	0,00	56,67	198,29

	PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 20



Come evidenziato dal grafico e dalla tabella il valore massimo della gittata è pari a 147,61 m circa con un angolo di distacco di circa $\vartheta = 75^\circ$.

A tale valore dovrà aggiungersi la distanza del vertice della pala dal baricentro pari a 56,67 m, per un valore complessivo della gittata:

$$G_{max} = 204,28 \text{ m.}$$

4.5 FRAMMENTO DI PALA

L'evento della rottura di un frammento di pala risulta poco frequente¹. Per le caratteristiche del materiale strutturale, tende ad essere una rottura progressiva. Pertanto, nella maggior



¹ Analysis of Risk-Involved Incidents of Wind Turbine – version 1.1 Januar 2005 – ECN: per la rottura Rottura Pala riporta una probabilità di $8,4 \cdot 10^{-4}$ [1/y] mentre per il frammento $2,6 \cdot 10^{-4}$ [1/y].

	PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 21

parte dei casi si ha una prima flessione della struttura con conseguente urto con la torre (posta sottovento nella quasi totalità delle WTG). La conseguente rottura dà luogo a traiettorie varie non calcolabili deterministicamente.



Nella maggior parte dei casi di lancio di piccoli frammenti di pala la causa registrata è la fulminazione di natura atmosferica. Tale fenomeno è stato considerato dai costruttori che hanno iniziato a dotare gli aerogeneratori di un sistema di convogliamento della corrente di fulminazione costituito da recettori metallici posti lungo la pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra. In questo modo è possibile drenare buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale. In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità della pala che si apre mediante la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala. È dunque possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala.

	PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 22

Per avere un ordine di grandezza sulla distanza raggiunta dai frammenti di una pala eolica, si fa riferimento allo studio “Recommendations of Risk assessment of ice throw and Blade Failure in Ontario – Canadian Wind Energy Association – M.P. Leblanc – Garrad Hassan”. Secondo tale studio, la probabilità che un frammento di pala staccatosi dalla turbina vada oltre i 50 m dalla torre è dell’ordine di 2×10^5 .

4.6 MASSIMA GITTATA DEL FRAMMENTO DI PALA

Volendo stabilire quale sia la gittata massima del frammento di pala, facendo riferimento al rischio accettato² in sede progettuale (pari a 10^6) si raggiunge tale valore a meno di 190 m.

A 190 m la probabilità diminuisce ancora di un fattore 10 e così via fino a definire eventi la cui probabilità di accadimento risulta quasi del tutto nulla.

5 RIBALTAMENTO TORRE EOLICA

Da tenere in considerazione è anche il caso di ribaltamento dell’intera torre eolica.

Il ribaltamento della torre e della fondazione risulta altamente improbabile in quanto le fondazioni sono di tipo indiretto (plinto su pali).

² European Wind Turbine Standards II

	<p align="center">PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”</p>	 		
	<p align="center">CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO</p>	<p>29/05/2023</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 23</p>



Figura 8- Ribaltamento della torre e del plinto

Si può verificare però in alcuni casi che la torre si ribalti a causa del troncamento della torre dal plinto.



Figura 9- Ribaltamento della torre alla radice

L'area dentro la quale potrebbe avvenire il ribaltamento avrebbe come raggio massimo l'altezza totale della torre che sarebbe circa 200m, ricadendo quindi all'interno del buffer ottenuto per la gittata massima con raggio di 204,28m.

	PARCO EOLICO “CELSO-PESCES”	 		
	CALCOLO GITTATA MASSIMA E RIBALTAMENTO	29/05/2023	REV.0	Pag. 24

Per l'area di sicurezza si sceglie pertanto l'area con raggio maggiore.

6 CONCLUSIONI

Partendo dai dati degli aerogeneratori in merito alla velocità di rotazione considerata (8,83 rpm) sono stati eseguiti dei calcoli di gittata con la teoria della fisica del punto materiale. Il calcolo illustrato nei paragrafi precedenti porta ad un valore massimo di gittata pari a 204,28 m.

La gittata massima calcolata garantisce la distanza di sicurezza a tutte le turbine sia dalle strade provinciali/statali sia da edifici abitabili (da analisi catastale) presenti nell'area del parco sia dai centri abitati maggiormente prossimi all'impianto. Si sottolinea inoltre come, il calcolo semplificato svolto in questa sede, risulti particolarmente cautelativo rispetto al calcolo rigoroso effettuabile mediante l'analisi di Moto Rotazionale Complesso.

AEROGENERATORE	DISTANZA DA STRADE PROVINCIALI/ STATALI	DISTANZA DA IMMOBILI DI CLASSE A- F1 E F3	GITTATA
WTG1	>250m	>400m	204,28 m
WTG2	>800m	>500m	204,28 m
WTG3	>300m	>450m	204,28 m
WTG4	>600m	>1300m	204,28 m
WTG5	>205 m	>450m	204,28 m
WTG6	>1500m	>300m	204,28 m