REGIONE PUGLIA

Comune di Sant'Agata di Puglia

Comune di Candela

Comune di Deliceto

Committente:

RWE RENEWABLES ITALIA S.R.L.
via Andrea Doria, 41/G - 00192 Roma
P.IVA/C.F. 06400370968

Titolo del Progetto:

PARCO EOLICO "SERRA PALINO"

CODICE PRATICA: PDDIDD8

Documento:

PROGETTO DEFINITIVO

Richiesta Autorizzazione Unica ai sensi del D. Lgs. 387 del 29/09/2003

N° Documento: PESPA-S15

ID PROGETTO:	PESPA	DISCIPLINA:	A	TIPOLOGIA:	RT	FORMATO:	A4

Elaborato:

RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI

FOGLIO:	1 di 19	SCALA:	/	Nome file:	PESPA-S15-0

Progettazione:

Hydro Engineering s.s.
di Damiano e Mariano Galbo
via Rossotti, 39
91011 Alcamo (TP) Italy

Progettisti:

(Ing. Mariano Galbo)

ORDINE DEGLI INGEGNERI PROV. TRAPANI
Ing. Mariano Galbo N. 724

Rev:	Data Revisione	Descrizione Revisione	Redatto	Controllato	Approvato
0	Novembre 2019	PRIMA EMISSIONE	EG	MG	DG

ISO A4

1 PREMESSA 3

2 STORICO DEGLI INCIDENTI 4

3 CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE 5

4 AEROGENERATORE TIPO DI RIFERIMENTO 7

5 ROTTURA PALA 8

5.1 FATTORI CHE INFLUENZANO LA GITTATA 8
5.2 MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO 9
5.3 ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE 10
5.4 DETERMINAZIONE GITTATA AEROGENERATORE D=155M 12
5.5 FRAMMENTO DI PALA 16
5.6 GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DI PALA 17

6 CONCLUSIONI 18

1 PREMESSA

La società Hydro Engineering s.s. è stata incaricata, dalla società RWE RENEWABLES ITALIA SRL, di redigere il progetto definitivo relativo alla costruzione di un parco eolico, composto da n. 8 aerogeneratori, ciascuno di potenza nominale pari a 6,00 MW, per una potenza complessiva di 48,00 MW, da ubicarsi in località "Serra Palino" del Comune di Sant'Agata di Puglia e in località "Ischia dei Mulini" del Comune di Candela con opere di connessione in località "La Marana" del Comune di Deliceto in Provincia di Foggia.

A seguito di approfonditi studi è stato individuato nell'area denominata "Serra Palino" un sito di interesse eolico. Saranno pertanto realizzate le infrastrutture necessarie alla costruzione del parco stesso e per lo sfruttamento dell'energia elettrica prodotta. La potenza totale da installare sarà di 48 MW equivalenti all'installazione di 8 aerogeneratori della potenza unitaria di 6,00 MW.

Come per tutte le attività umane, esistono rischi legati alla esistenza e al funzionamento del parco eolico per coloro che abitano nelle immediate vicinanze. I rischi potenziali sono dovuti alla presenza di componenti pesanti e in movimento e alla vicinanza di linee elettriche in media tensione. L'analisi condotta consiste nello stimare l'impatto che può avere la rottura dell'organo rotante di una torre eolica, con un conseguente distacco e lancio di una pala o di un frammento di questa. Tutte le analisi qui effettuate non tengono conto degli effetti di portanza aerodinamica sulle pale, ma unicamente degli effetti gravitazionali. Gli studi condotti hanno tuttavia dimostrato che questa approssimazione rispecchia piuttosto bene ciò che avviene nella realtà. L'analisi per la combinazione dei carichi, per i materiali usati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura si fa riferimento alla norma CEI EN61400-1.

L'analisi è stata condotta per i seguenti casi:

- distacco di una pala intera pala eolica;
- distacco di un frammento di pala eolica.

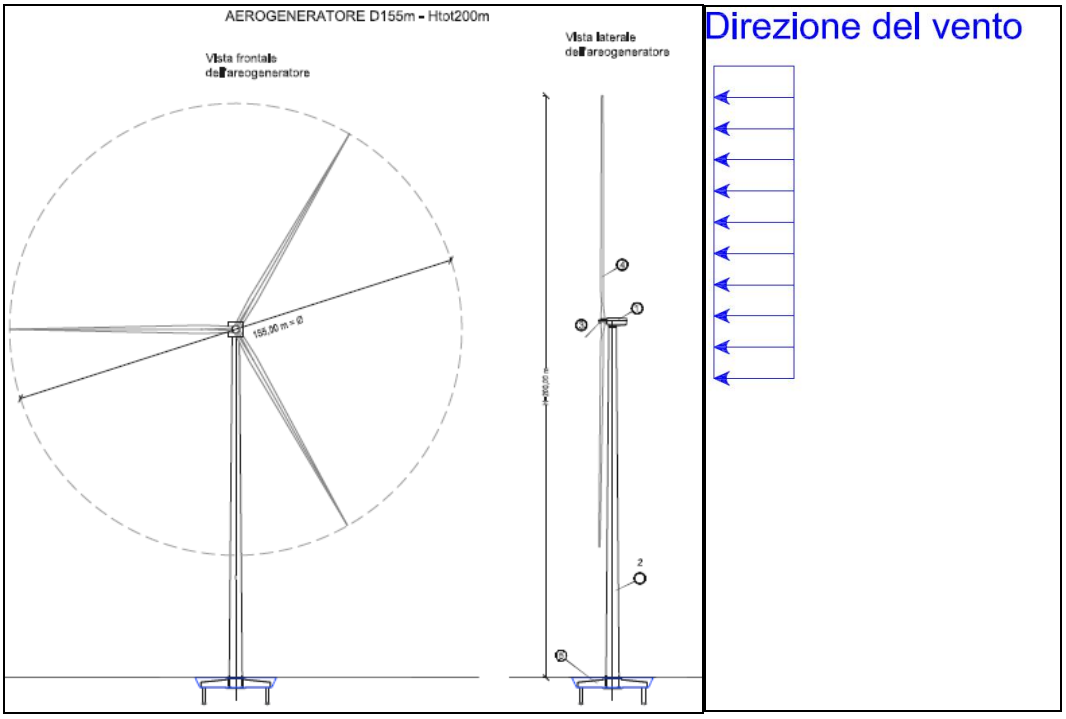
In qualsiasi caso, la gittata massima e la velocità all'impatto sono dei fattori determinanti per la stima del rischio. La gittata massima dipende dal prodotto "raggio della pala x velocità di rotazione". Il calcolo presenta comunque alcune complessità in quanto le variabili in gioco sono numerose ed 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. Considerando, quindi, la natura della pala avente un profilo aerodinamico, lo studio del moto risulta complesso, a causa di tutte le forze e dei momenti che nascono al momento del distacco e nell'interazione col vento.

2 STORICO DEGLI INCIDENTI

Il tasso d'incidentalità, nell'ultimo decennio, è ancora diminuito a seguito dell'evoluzione tecnologica e del miglioramento delle macchine eoliche, malgrado l'aumento medio delle loro dimensioni. Uno studio danese ha condotto su 18 mesi, tra il 1998 e i 1999, un'analisi riguardante le pale, le navicelle e le torri di 2.130 rotori, per una produzione complessiva di 540 MW. Su 3.195 anni cumulati di funzionamento, solo 7 incidenti hanno comportato la distruzione delle pale. Il tasso è dunque di un incidente ogni 457 anni-macchina. Si noti che la Danimarca presenta maggiori rischi di guasti e di sospensione della produzione a causa della presenza di brina e di ghiaccio. Un altro studio danese a partire da dati registrati su 120 mesi tra il 1993 e il 2003 in un parco di 1.912 impianti mostra una probabilità di distruzione di 0,00083 impianti per anno. In ambito rurale, la correlazione di questa statistica (6x10-5/anno) con la probabilità di occupazione di un m^2 di terreno da parte di una persona individua una probabilità globale di ferire qualcuno molto bassa.

3 CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

Le pale di un aerogeneratore sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore. Vi è 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 offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo, indipendentemente dalla direzione del vento, un verso orario di rotazione.
Si riporta di seguito una figura esemplificativa che evidenzia il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento.



Relazione tra direzione del vento e rotazione delle pale.

Questa considerazione servirà 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:

Fig. 4-1a. Schema di navicella completa di rotore e di pale (1. Raffreddamento olio; 2. Raffreddamento generatore; 3. Trasformatore; 4. Sensori condizioni vento; 5. Sistema controllo; 6. Argano e rotaia di movimentazione pezzi; 7. Punto di controllo generatore; 8. Collegamento generatore-moltiplicatore giri; 9. Azionamento imbardata; 10. Moltiplicatore; 11. Freno di stazionamento; 12. Cella di sostegno macchinario; 13. Cuscinetto di pala; 14/15. Albero; 16. Collegamento per azionamento pitch; 17. Controller dell'albero)

4 AEROGENERATORE TIPO DI RIFERIMENTO

Le macchine di riferimento per il calcolo avranno le seguenti caratteristiche:

Aerogeneratore TIPO SG 6.0

ROTORE

- diametro 155 m
- area spazzata 18869 m^2
- velocità di rotazione max 12 rpm
- numero pale 3

TORRE

- tipo: tubolare
- struttura: sezioni collegate tramite flangiatura
- altezza hub 122.5 m

FUNZIONAMENTO

- cut-out 27 m/s (velocità del rotore gradualmente ridotta)
- Potenza 6.0 MW

5 ROTTURA 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.

Le modalità di rottura sono classificabili in due gruppi:

1) Rottura della pala alla radice.

2) Rottura di frammento.

5.1 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 stessa o della 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 per cui il verificarsi di un moto a giavellotto è 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 al moto e riducono il tempo e la distanza di volo.

La traiettoria iniziale della pala/sezione di pala distaccata è determinata principalmente 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.

Il tempo di volo generalmente è determinato:

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

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

Distanza percorsa

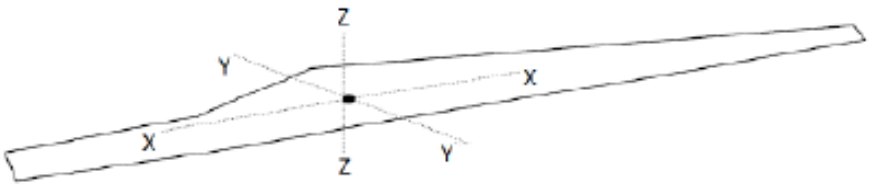
La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

- 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;
- dal tempo di volo.

5.2 MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO

Il moto reale della parte distaccata risulta molto complesso, poiché dipendente, come detto, 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, come accennato, 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 modello "Complex Rotational Motion", che permette di studiare il moto nel suo complesso, considerando i moti di rotazione intorno agli assi xx, yy, zz.



La rotazione della pala intorno all'asse zz è causato dalla conservazione del momento della quantità di moto: in caso di rottura, per il principio di conservazione, il generico spezzone 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 yy: centro di massa e centro aerodinamico della pala/sezione di pala non coincidono;
- un momento intorno all'asse xx: centro di massa della sezione di pala lungo la corda e il centro aerodinamico non coincidono.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di distacco/lancio e dalle forze inerziali agenti 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 numero di giri del rotore e quindi dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;

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

Possiamo pertanto concludere che:

- se effettuiamo un calcolo che tenga conto dei valori cinematici e geometrici del moto senza considerare gli effetti viscosi e soprattutto la complessità del moto rotazionale otteniamo valori di gittata più alti di quelli reali (valore teorico > valore reale)
- più che dalle dimensioni dell'aerogeneratore e dell'altezza della torre, i valori della gittata dipendono dalla velocità di rotazione.

5.3 ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE

La rottura della pala alla radice è un evento che storicamente è risultato frequente (rispetto al numero di rotture totali) in quanto la sezione di attacco risulta assai "critica" dal punto di vista strutturale.

Le cause sono sostanzialmente due:

1) La discontinuità della struttura che passa da un carico distribuito sulle fibre alla flangia di attacco crea inevitabili concentrazioni tensionali che con l'andare del tempo può creare problemi di affaticamento con conseguente rottura. C'è da dire che i costruttori hanno ben chiaro il problema e che negli ultimi anni si sono introdotti diversi accorgimenti che hanno migliorato di molto le prestazioni.

2) La rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo. II longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni serrati opportunamente durante l'installazione della turbina.

Il precarico conferito ai bulloni durante il serraggio ha un'influenza 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 plausibile riduzione del precarico possono determinare la rottura per fatica dei bulloni ed al distacco della pala.

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

1) distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;

2) baricentro posizionato ad 1/3 della lunghezza della pala;

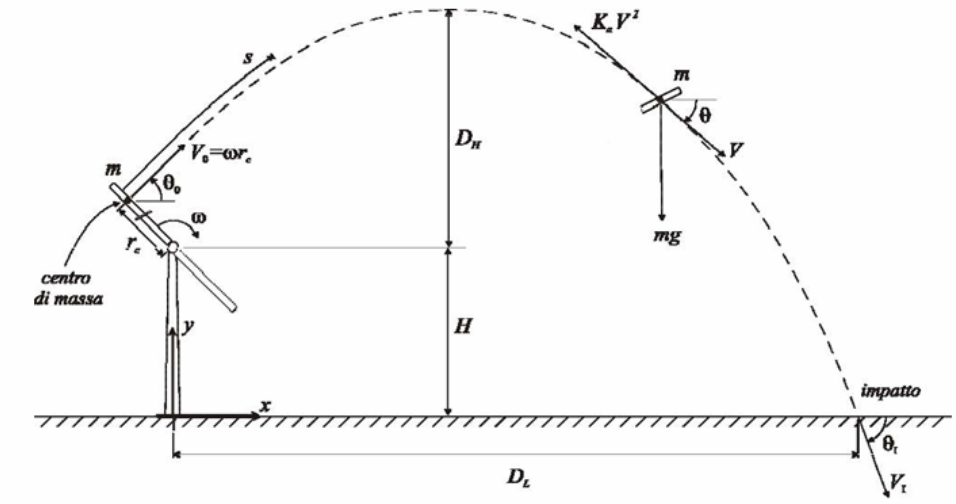
3) assenza di attriti viscosi durante il volo: questa ipotesi risulta conservativa considerando che in letteratura si registra, a causa degli effetti di attrito, una diminuzione del tempo di volo anche del 20%;

4) distacco in corrispondenza di un angolo di 310°-315°° rispetto alla verticale, che dal punto di vista teorico garantisce la massima gittata (moto in senso orario);

5) distacco alla rotazione di funzionamento massima;

6) vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;

7) assenza di effetti di "portanza" del profilo alare.



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 m/s 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.

La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo T tale che Y(T)=0

Dalla legge del moto si ottiene

$$T = v_y/g + 1/g\sqrt{(v_y^2 + 2y_0 g)}$$

scartando la soluzione corrispondente a tempi negativi.

Consideriamo 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 2πradianti, per n giri avremo 2πn radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare ω del corpo in movimento. Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

$$\omega = 2\pi n/60 \text{ rad/sec}$$

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 = 25.8 m essendo il diametro del rotore D = 155 m ed il raggio di ciascuna pala R = 76 m circa.

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 10.5 giri/minuto. Per questa velocità angolare, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$V_g = \omega r_g = 2\pi n/60\ r_g = 32.45 \text{ m/sec}$$

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:

$$x_o = -r_g \cos(\vartheta);$$
$$y_0 = H + r_g \sin(\vartheta);$$
$$v_x = V_g \sin(\vartheta);$$
$$v_y = V_g \cos(\vartheta).$$

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 (100 m). Dalla legge del moto otteniamo:

$$L = X(t)$$

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

$$L = -r_g \cos(\vartheta) + Vg \sin(\vartheta)/g * [Vg \cos(\vartheta) + \sqrt{(Vg^2 \cos 2(\vartheta) + 2*(H + r_g \sin(\vartheta))\ g}]$$

5.4 DETERMINAZIONE GITTATA AEROGENERATORE D=155M

L'applicazione delle formule sopra descritte ha portato alla determinazione del valore di

gittata massima di seguito esposto.

Dati di input:

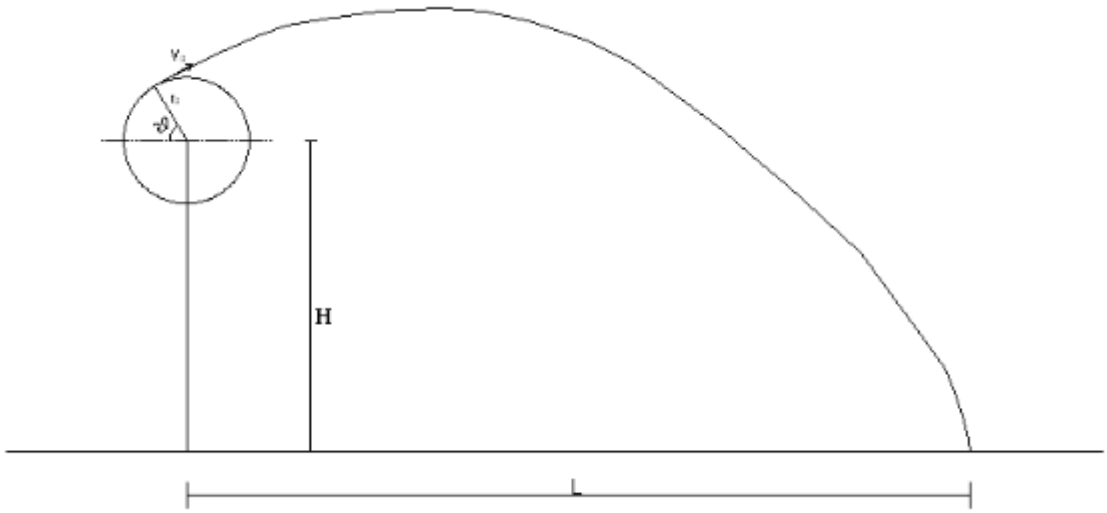
Vg = 32.45 m/s;

rg = 25.8 m;

g = 9.81m/s;

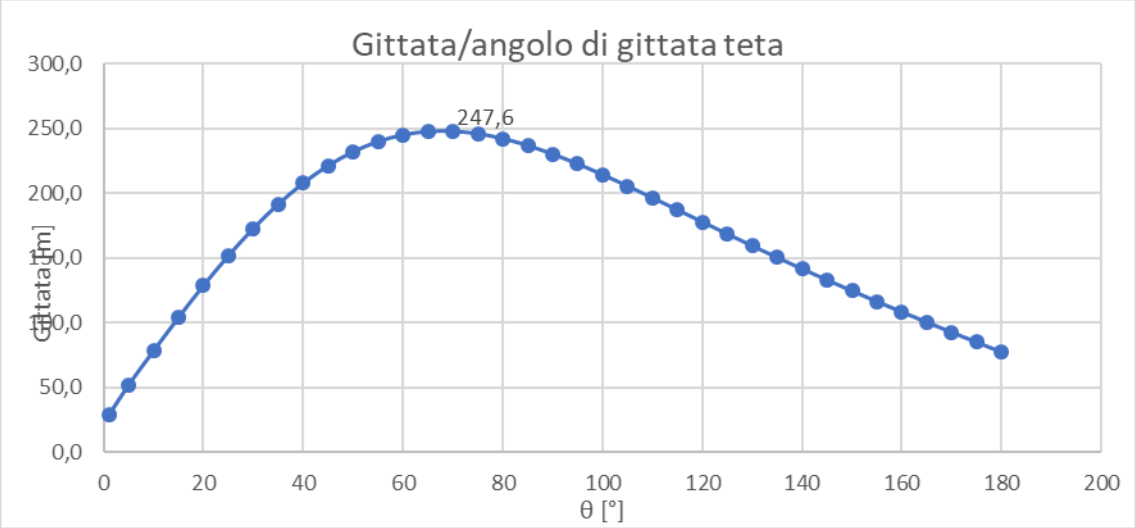
H= 122.5 m.

Il valore della gittata dipenderà dall'angolo ϑ.



Si noti che fissato un generico angolo ϑ, la gittata aumenta quadraticamente con V_g salvo i casi particolari $\vartheta=\pm 90°$, $\vartheta=0°$, $\vartheta=180°$., nei quali la gittata aumenta linearmente con V oppure è pari a r_g. Come si evidenzia dal grafico e numericamente dalla tabella sotto riportata il valore massimo della gittata è pari a 195.97 m circa con un angolo di distacco di circa $\vartheta = \pi/3$ rad. e più precisamente pari a 70°. A tale valore dovrà aggiungersi la distanza del vertice della pala dal baricentro, 51.67 m, per un valore complessivo della gittata: $\underline{L_{tot} = 247.6\ m}$.

x_0 [m]	V_x [m/s]	y_0 [m]	V_y [m/s]	g [m/s^2]	n [/]	ω [rad/s]	r_g [m]	D [m]	R [m]	V_g [m/s]	$V_{g(+)}$ [m/s]	H [m]	L(T) [m]	ϑ [°]	ϑ [rad]	$D_{bar/verticepala\ [m]}$	L_{tot} [m]
-25,8	0,595	122,951	0,595	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	-22,82	1	0,02	51,67	28,9
-25,7	2,828	124,752	32,323	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	0,62	5	0,09	51,67	52,3
-25,4	5,634	126,986	31,954	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	26,95	10	0,17	51,67	78,6
-25,0	8,398	129,186	31,341	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	52,64	15	0,26	51,67	104,3
-24,3	11,097	131,336	30,490	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	77,20	20	0,35	51,67	128,9
-23,4	13,713	133,418	29,407	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	100,18	25	0,44	51,67	151,8
-22,4	16,223	135,417	28,100	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	121,18	30	0,52	51,67	172,9
-21,2	18,611	137,317	26,579	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	139,89	35	0,61	51,67	191,6
-19,8	20,856	139,105	24,856	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	156,05	40	0,70	51,67	207,7
-18,3	22,943	140,767	22,943	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	169,50	45	0,79	51,67	221,2
-16,6	24,856	142,289	20,856	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	180,16	50	0,87	51,67	231,8
-14,8	26,579	143,661	18,611	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	188,03	55	0,96	51,67	239,7
-12,9	28,100	144,872	16,223	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	193,18	60	1,05	51,67	244,8
-10,9	29,407	145,913	13,713	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	195,76	65	1,13	51,67	247,4
-8,84	30,49	146,78	11,10	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	195,97	70	1,2	51,67	247,6
-6,7	31,341	147,453	8,398	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	194,06	75	1,31	51,67	245,7
-4,5	31,954	147,941	5,634	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	190,31	80	1,40	51,67	242,0
-2,3	32,323	148,235	2,828	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	185,00	85	1,48	51,67	236,7
0,0	32,447	148,333	0,000	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	178,43	90	1,57	51,67	230,1
2,3	32,323	148,235	-2,828	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	170,87	95	1,66	51,67	222,5
4,5	31,954	147,941	-5,634	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	162,58	100	1,75	51,67	214,2
6,7	31,341	147,453	-8,398	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	153,78	105	1,83	51,67	205,4
8,8	30,490	146,775	-11,097	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	144,66	110	1,92	51,67	196,3
10,9	29,407	145,913	-13,713	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	135,38	115	2,01	51,67	187,1
12,9	28,100	144,872	-16,223	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	126,07	120	2,09	51,67	177,7
14,8	26,579	143,661	-18,611	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	116,82	125	2,18	51,67	168,5
16,6	24,856	142,289	-20,856	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	107,69	130	2,27	51,67	159,4
18,3	22,943	140,767	-22,943	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	98,72	135	2,36	51,67	150,4
19,8	20,856	139,105	-24,856	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	89,94	140	2,44	51,67	141,6
21,2	18,611	137,317	-26,579	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	81,37	145	2,53	51,67	133,0
22,4	16,223	135,417	-28,100	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	72,99	150	2,62	51,67	124,7
23,4	13,713	133,418	-29,407	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	64,80	155	2,71	51,67	116,5
24,3	11,097	131,336	-30,490	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	56,77	160	2,79	51,67	108,4
25,0	8,398	129,186	-31,341	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	48,89	165	2,88	51,67	100,6
25,4	5,634	126,986	-31,954	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	41,13	170	2,97	51,67	92,8
25,7	2,828	124,752	-32,323	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	33,45	175	3,05	51,67	85,1
25,8	0,000	122,500	-32,447	9,81	12,00	1,26	25,83	155	77,5	32,45	34,069	122,5	25,83	180	3,14	51,67	77,5



Dati di input calcolo AEROGENERATORE di riferimento:

D= 155 m;

Hmozzo=122.5 m;

rpm= 12.0;

Lpala=76.0 m;

Gittata max., totale = 247.6 m

5.5 FRAMMENTO DI PALA

L'evento della rottura di un frammento consistente di pala risulta meno frequente[1]. Per le caratteristiche del materiale strutturale, tende ad essere una rottura progressiva. Pertanto, nella maggior parte dei casi si ha una prima flessione della struttura con conseguente inevitabile urto con la torre (posta sottovento nella quasi totalità delle WTG). La conseguente rottura dà luogo a traiettorie varie che non sono deterministicamente calcolabili.

Esempio di rottura di pala senza distacco.

Nella maggior parte dei casi di lancio di piccoli frammenti di pala la causa registrata è la concomitanza di fulminazioni 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 si riesce a drenare una 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 per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala. È 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. 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".

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

Secondo tale studio, la probabilità che un frammento staccatosi di pala staccatosi dalla turbina vada oltre i 50 m dalla torre è dell'ordine di $2x10^{-5}$.

Si vuole rimarcare che, sulla base di accurati studi statistici su aerogeneratori di grossa taglia, la rottura di un frammento di pala è da escludere in considerazione delle caratteristiche costruttive delle pale stesse. Il distacco dell'intera pala è invece potenzialmente possibile.

5.6 GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DI PALA

Volendo stabilire quale sia la gittata massima del frammento di pala, facendo riferimento al rischio accettato[2] 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, per eventi rari come quelli della rottura di una pala la probabilità diventa praticamente nulla.

[2] European Wind Turbine Standards II

6 CONCLUSIONI

Partendo dai dati degli aerogeneratori in merito alla velocità di rotazione (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 247.6 m nel caso di aerogeneratore con diametro rotore pari a 155m. Pertanto, la gittata massima calcolata garantisce la distanza di sicurezza da strade provinciali, strade statali, edifici presenti nell'area del parco (censiti come civili abitazioni) e dalla ferrovia.

Si sottolinea come, da dati messi a disposizione da fornitori di turbine eoliche, il calcolo rigoroso (paragrafo 5.2) porta a risultati meno cautelativi di quanto non lo siano quelli effettuati in questa sede. Come visibile dalla tabella sotto riportata, la gittata è inferiore rispetto a tutte le distanze citate ed estrapolate dal nuovo layout dell'impianto eolico di Serra Palino.

Aerogeneratore	Distanza immobili (civili abitazioni) [m]	Distanza da statale [m]	Distanza da provinciale [m]	Distanza da strada regionale [m]	Distanza da ferrovia [m]	Gittata [m]
PESPA-01	737,1	>2000	1168,5	1686	1135	247,6
PESPA-02	1080,5	>2000	1075,3	968	1211,6	247,6
PESPA-03	802,9	>2000	657,7	1080,8	>2000	247,6
PESPA-04	826,6	>2000	1670,5	>2000	>2000	247,6
PESPA-05	974,4	>2000	1498	1940	>2000	247,6
PESPA-06	553,2	>2000	1190,7	1920	>2000	247,6
PESPA-07	1123	>2000	1022,9	1577	>2000	247,6
PESPA-08	732,4	>2000	596,9	1289	>2000	247,6