

**Comune di LACEDONIA**

(Provincia di Avellino)

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO EOLICO**

in Località "Macchiafocaccia, Montevaccaro, Serro del Casonetto, San Mauro"

*Elaborato C***Relazione gittata elementi rotanti**

COMMITTENTE

ECOENERGIA LACEDONIA S.R.L.

Via Cardito n. 5  
83012 - CERVINARA (AV)PROGETTISTA  
Ing. Saverio VitaglianoDATA  
Marzo 2020

SPAZIO PER I VISTI

**INDICE**

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>2</b>
<b>2. CENNI SUI PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE.....</b>	<b>2</b>
<b>3. ROTTURA DELLA PALA .....</b>	<b>3</b>
<b>4. CALCOLO DELLA TRAIETTORIA REALE DI UN FRAMMENTO DELLA PALA .....</b>	<b>5</b>
<b>4.1 Fondamenti di Calcolo della traiettoria reale.....</b>	<b>5</b>
<b>4.2 Applicazione del calcolo della traiettoria reale alla Turbina VESTAS V150 .....</b>	<b>7</b>
<b>5. CONSIDERAZIONI FINALI.....</b>	<b>9</b>
<b>6. Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento VESTAS V126.....</b>	<b>21</b>

## 1. PREMESSA

La seguente relazione tecnica specialistica è riferita al progetto per la realizzazione di un parco eolico proposto dalla società **Ecoenergia Lacedonia S.r.l.** con sede legale in Cervinara (AV) alla Via Cardito n. 5.

La proposta progettuale è finalizzata alla realizzazione di un impianto eolico per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile eolica, costituito da 11 aerogeneratori, di cui n. 10 di potenza nominale ciascuno pari a 4,2 MW e n. 1 di potenza nominale pari a 3 MW per una potenza complessiva di 45 MW, da realizzarsi nella Provincia di Avellino, nel territorio comunale di Lacedonia, in cui insistono gli aerogeneratori e le opere di connessione alla RTN.

La relazione ha lo scopo di verificare e calcolare la gittata massima in caso di rottura della pala e/o di un frammento di pala di un aerogeneratore.

## 2. CENNI SUI PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

Nel dettaglio, le pale sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore; il mozzo, a sua volta, è collegato ad un primo albero di trasmissione, detto albero lento, che ruota alla stessa velocità angolare del rotore.

L'albero lento è, nella maggior parte dei casi, collegato ad un moltiplicatore di giri, da cui si diparte un albero veloce, che ruota con velocità angolare data da quella dell'albero lento per il rapporto di trasmissione del rotismo installato. Tutti i componenti sopra menzionati, ad eccezione, del rotore e del mozzo, sono ubicati entro una cabina, detta navicella la quale, a sua volta, è sistemata su un supporto-cuscinetto, in maniera da essere facilmente orientata secondo la direzione del vento.

Oltre ai componenti su elencati, vi è un sistema di controllo che esegue, il controllo della potenza ruotando le pale intorno al loro asse principale, il controllo dell'orientamento della navicella, detto controllo dell'imbardata, che serve ad allineare la macchina rispetto alla direzione del vento. Si riporta di seguito una figura che evidenzia il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento che causa tale moto. La conformazione del profilo alare dell'aerogeneratore è fissa, mentre è mobile il rotore sul quale sono ancorate le pale. Questo garantisce il fatto che il rotore possa orientarsi rispetto al vento in modo tale da offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo indipendentemente dalla direzione del vento un verso orario di rotazione. Questa

considerazione ci 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 ed a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano. Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva e quindi si capisce la direzione lungo la quale l'eventuale pala o parte di essa che si distacca percorre il suo moto. Mettendo in relazione la traiettoria del corpo che si distacca con la corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può essere o meno un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.

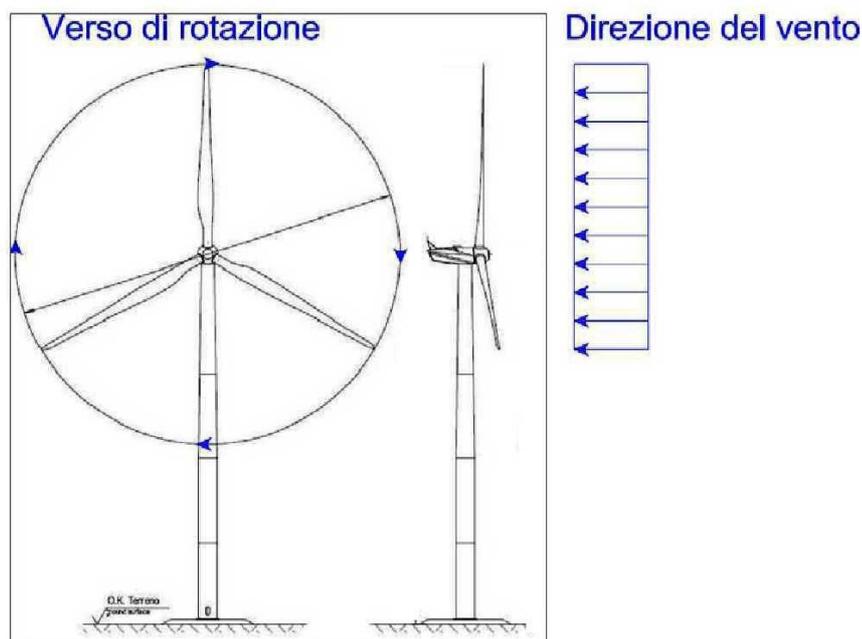


Figura 1: Relazione tra le direzioni del vento ed il verso di rotazione del rotore

### 3. ROTTURA DELLA PALA

Il calcolo della gittata massima in caso di rottura di una pala dell'Aerogeneratore segue il principio della balistica applicata ai moto dei proiettili. Si evidenzia che i calcoli sono fatti considerando nullo l'attrito con l'aria.

Nel caso in esame (tipologia VESTAS V150) si suppone che l'eventuale rottura della pala avvenga alle peggiori condizioni possibili ovvero:

1. alla velocità massima del rotore, pari a circa 12 giri/minuto
2. nel punto di ascissa e ordinata in cui la gittata è massima, con angolo =  $-\pi/4$
3. con il centro di massa posizionato ad  $1/3$  della lunghezza della pala, in prossimità del mozzo.

L'aerogeneratore di tipo VESTAS V150 previsto ha altezza al mozzo uguale a 105 mt, le pale costituenti il rotore sono lunghe 75 mt.

### Definizioni

$H_m$  = Altezza al mozzo dell'aerogeneratore = 105 mt

$L_P$  = Lunghezza della pala dell'aerogeneratore = 75 mt

$D_{cm}$  = Distanza dal mozzo del Centro di Massa della Pala =  $L_P / 3 = 25$  mt

$V_{ang}$  = Max Velocità Angolare Rotore = 12 Giri/Minuto =  $12 * 2\pi / 60 = 1.26$  Rad/sec

### Formule e Calcoli risultanti

L'Ordinata di Massima Velocità  $O_{mv}$  al momento di rottura è data dalla somma dell'altezza del mozzo più la componente verticale del Centro di Massa:

$$O_{mv} = \text{Ordinata di Massima Velocità} = H_m + D_{cm} * \text{Radice}(2)/2 = \mathbf{123 \text{ m}}$$

Analogamente l'ascissa di Massima Velocità  $A_{mv}$  al momento di rottura:

$$A_{mv} = \text{Ascissa di Massima Velocità} = - D_{cm} * \text{Radice}(2)/2 = \mathbf{-17.68 \text{ m}}$$

La Velocità Lineare al Centro di Massa  $V_{max}$  è desunta dalla Velocità Angolare  $V_{ang}$

$$V_{max} = \text{Velocità Lineare al Centro di Massa} = V_{ang} * D_{cm} = \mathbf{31.41 \text{ m/sec}}$$

Le componenti Verticale  $V_y$  ed Orizzontale  $V_x$  di tale velocità Lineare al Centro di Massa si ottengono moltiplicando per il Seno ed il Coseno dell'angolo:

$$V_y = \text{Componente Verticale Velocità} = V_{max} * \text{Radice}(2)/2 = \mathbf{22.21 \text{ m/sec}}$$

$$V_x = \text{Componente Orizzontale Velocità} = V_{max} * \text{Radice}(2)/2 = \mathbf{22.21 \text{ m/sec}}$$

Il tempo necessario  $T_y$  perché la componente verticale della velocità sia nullo è dato dalla formula:

$$- \quad T_y = \text{Tempo di decelerazione Verticale} = V_y / 9.8 \text{ m/sec}^2 = \mathbf{2.27 \text{ sec}}$$

L'altezza Massima  $H_{max}$  si ottiene dalla formula:

$$- \quad H_{max} = O_{mv} + V_y * T_y - 1/2 * g * T_y^2 = \mathbf{148.15 \text{ m}}$$

Il tempo necessario  $T_{max}$  affinché l'elemento rotante precipiti a terra dalla sommità si ottiene dalla relazione:

$$T_{max} = \text{tempo di caduta} = \text{Radice}(148,15/9.8\text{m/sec}^2) = \mathbf{3.89 \text{ sec}}$$

La distanza massima  $DL_{max}$  dalla base della torre percorsa dall'elemento rotante distaccatosi è quindi fornito dalla formula:

$$DL_{max} = V_x * (T_{max} + T_y) + A_{mv} + (L_p - D_{cm}) = \mathbf{169.13 \text{ m}}$$

#### 4. CALCOLO DELLA TRAIETTORIA REALE DI UN FRAMMENTO DELLA PALA

##### 4.1 Fondamenti di Calcolo della traiettoria reale

La determinazione di una traiettoria reale che tenga conto della resistenza dell'aria, è fattibile con un calcolo iterativo che consideri la traiettoria come una successione di elementi minimi, per ciascuno dei quali sia possibile ricalcolare la distanza, l'altezza, l'inclinazione e la velocità finali. Il calcolo risulta facilitato se la sequenza dei punti è determinata da incrementi di tempo costanti  $t_e$ . Passando dal punto **P** a quello successivo gli elementi della traiettoria possono allora essere così ricalcolati:

##### Tempo totale

$$t_{p+1} = t_p + t_e$$

##### Ascissa o distanza in piano

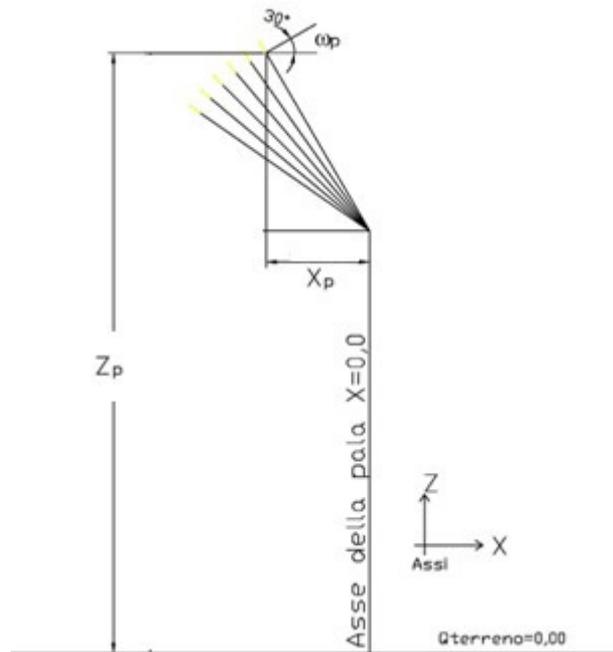
$$X_{p+1} = X_p + \cos\omega_p \times V_p \times t_e$$

##### Altezza o quota

$$Z_{p+1} = Z_p + \sin\omega_p \times V_p \times t_e - g \times t_e^2 / 2$$

Si precisa che:

1. si assume come origine degli assi la base della torre della turbina ed un sistema di riferimento come illustrato nella figura seguente;
2.  $X_p$  e  $Z_p$  sono le coordinate di partenza del centro di massa del frammento di pala e variano al variare dell'angolo di partenza;
3.  $X_p$  e  $Z_p$  sono state ricavate graficamente così come indicato nella seguente immagine:



### Inclinazione

$$\omega_{p+1} = \arctan [\tan \omega_p - g \times (X_{p+1} - X_p) / (\cos^2 \omega_p \times V_p^2)]$$

### Velocità

$$V_{p+1} = [(V_p^2 - 2g \times (Z_{p+1} - Z_p)) - \sigma_p \times t_e]^{1/2}$$

dove  $\sigma$  la decelerazione (o **ritardazione** come si dice in balistica) causata dalla resistenza dell'aria.

Per valutare la **resistenza R** opposta dall'aria, la formula usata nella meccanica dei fluidi è in genere la seguente:

$$R = 1/2 \times C_r \times \rho \times S \times V^2$$

dove:

**R** = resistenza (N)

S = sezione del corpo rispetto al movimento (m<sup>2</sup>)

V = velocità (m/s)

C<sub>r</sub> = coefficiente di forma (adimensionale)

$\rho$  = densità del fluido attraversato (kg/m<sup>3</sup>m)

E' da notare che il **coefficiente di forma C<sub>r</sub>** varia esso stesso in funzione della velocità, ma può essere considerato costante per variazioni di velocità che non comportano significativi

cambiamenti nei regimi di turbolenza del fluido attraversato. Oggi sono disponibili numerosi modelli di simulazione che consentono di calcolare con approssimazione il valore di  $C_r$ .

Essendo  $R$  e  $\sigma$  ovviamente correlati dalla massa  $m_f$  (kg) del frammento secondo la relazione  $R = m_f \times \sigma$ , per un regime uniforme di velocità, la ritardazione ( $m/s^2$ ) è così esprimibile:

$$\sigma = (1/2 \times C_r \times \rho \times S \times V^2) / m_f$$

ciò significa che a parità di altre condizioni la ritardazione diminuisce con l'aumentare della massa del frammento e aumenta con l'aumentare della sua sezione.

#### 4.2 Applicazione del calcolo della traiettoria reale alla Turbina VESTAS V150

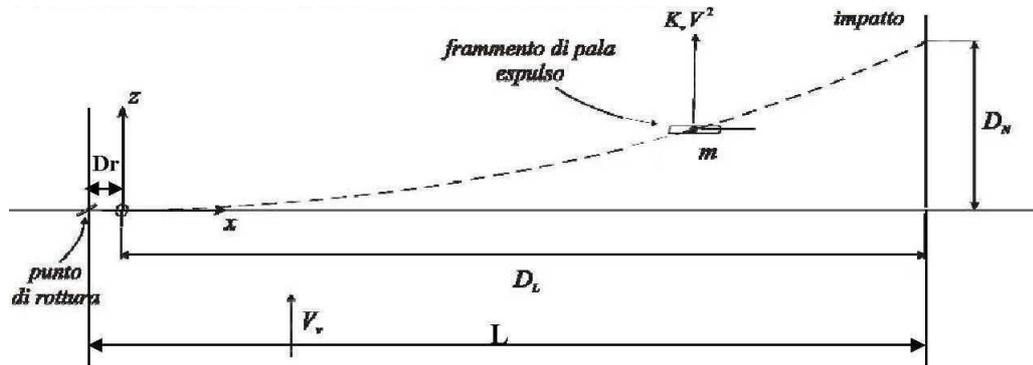
Il calcolo della gittata del frammento di pala è stato condotto considerando i seguenti dati di partenza:

$S = 4,0 \text{ m}^2$  (sezione del corpo rispetto al movimento)

$V_0 = 90,05 \text{ m/s}$  (velocità di partenza che tiene conto di tutte le condizioni al contorno)

Calcolo della velocità  $V_0$ :

1. Dalla campagna anemometrica si evince che le velocità del vento sul sito variano prevalentemente da 0 a 10 m/s, quindi la probabile rottura del frammento avverrà in questo range di velocità;
2. Inoltre l'azione dinamica del vento, ortogonale al piano che contiene la parabola, riduce ulteriormente lo sviluppo della traiettoria reale rispetto a quella teorica quindi tanto maggiore è la velocità del vento tanto maggiore è la curvatura fuori dal piano;



Quindi  $V_0$  viene ricavato dalla seguente formula:

$$V_0 = V_r \times 2\pi / 60 \times R_f$$

Dove

$V_r$  è la velocità di rotazione

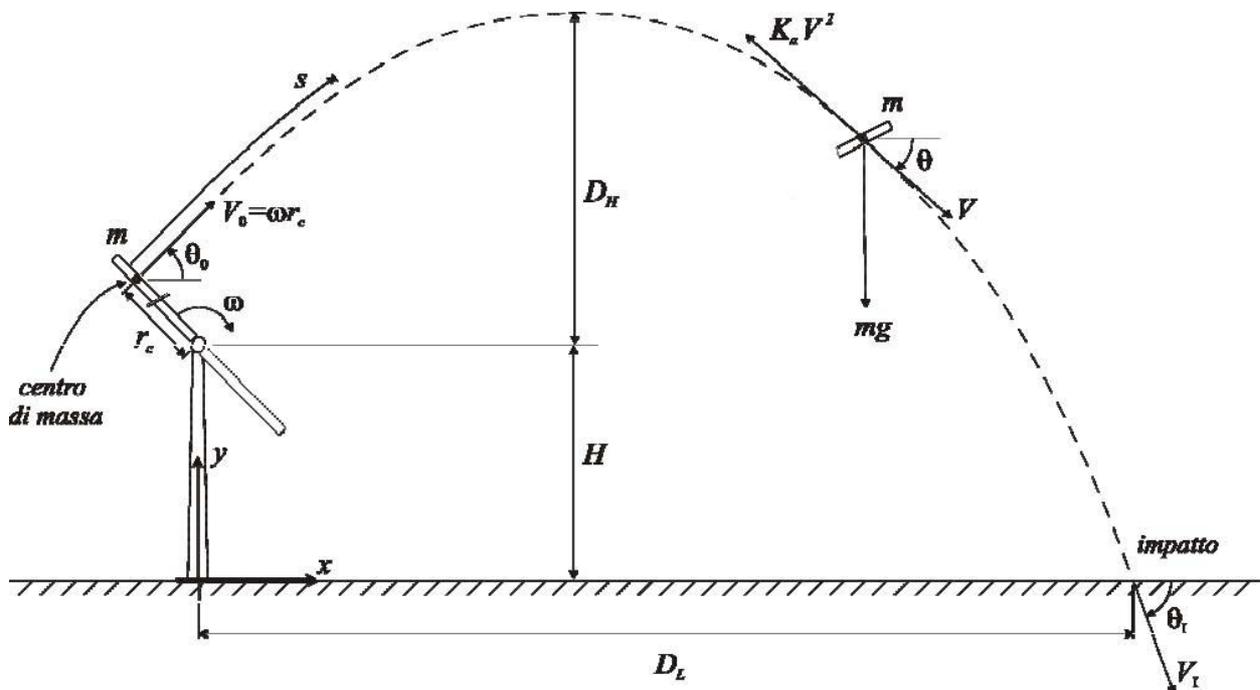
$R_f$  è il raggio del frammento di pala (dall'asse navicella al centro di massa del frammento)

$V_0 = 90.05 \text{ m/s}$

$C_r = 1,5$  (coefficiente di forma (adimensionale))

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  (densità del fluido attraversato)

$m_f = 150 \text{ kg}$  (massa del frammento)



Vista frontale dell'aerogeneratore e della traiettoria di un frammento di pala espulso

Preme sottolineare che i dati riportati sono altamente cautelativi perché l'aerogeneratore di progetto, modello VESTAS V150, ha un diametro di 150 m ed inoltre è prodotta con una

tecnologia moderna che ha consentito di avere pesi ridotti della pala ed avere tutta una serie di dispositivi di protezione atti ad evitare incidenti. Di conseguenza considerando i risultati riportati nella presente relazione si sovradimensiona in modo netto la reale gittata della pala/sezione-di-pala in caso di distacco. Volendo dedurre dei risultati più reali per l'aerogeneratore V150 di progetto si può affermare che i dati riportati nel seguente grafico sono ampiamente esaustivi.

Di seguito sono riportati i grafici delle traiettorie calcolati al variare dell'angolo di lancio con il metodo complesso:

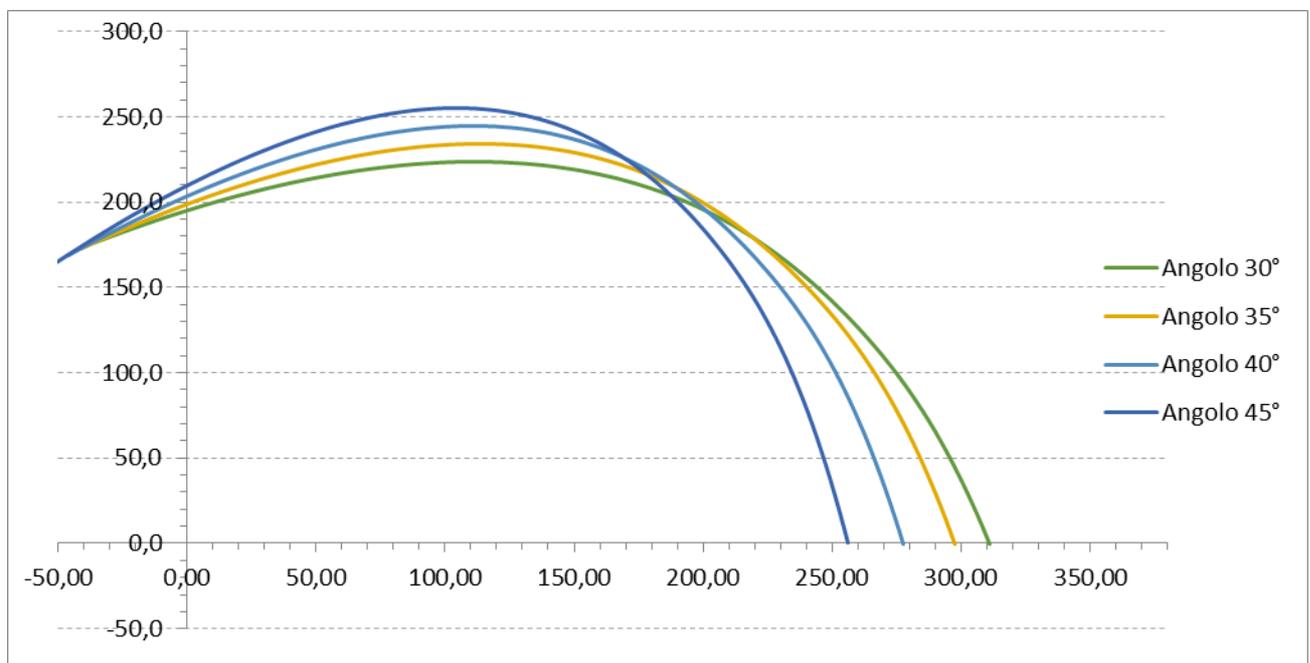


Grafico della traiettoria di un frammento di pala

## 5. CONSIDERAZIONI FINALI

Ponendoci nella condizione peggiore che un frammento o l'intera pala si staccasse dal mozzo, si è dimostrato che l'impatto della stessa avviene a distanze molto contenute.

Infatti nel caso si staccasse l'intera pala il suo valore massimo di gittata è di **170** mt alla velocità massima di rotazione, nella direzione prevalente di vento e trascurando l'attrito dell'aria.

Nel caso di rottura di un frammento di pala, per il quale vigono solo calcoli di tipo probabilistico, come si evince dai calcoli, si ha un valore di gittata massima di **315 mt** per un frammento pari a 5 m della pala.

Tale valore risultante dai calcoli è perfettamente in linea con quanto dichiarato nel gennaio 2012 da degli esperti dei Dipartimenti di Protezione ambientale e Sanità Pubblica del Massachusetts che hanno affermato “nella maggior parte dei casi la gittata è limitata ad un raggio non superiore all’altezza della pala”.

Si tenga presente che tale valore nella realtà risulta inferiore; difatti è giusto considerare agire simultaneamente le condizioni peggiori di velocità del vento, di angolo di lancio, velocità di rotazione, azione di portanza sul profilo alare dopo il distacco ma le cause che porterebbero ad un eventuale distacco della pala o parte di essa sono rappresentate da un colpo di fulmine o da un urto accidentale di notevole intensità agente alla base della torre.

L’accadimento di tali fenomeni ha un valore di rischio molto basso, resi ancora più bassi dal fattore di contemporaneità. Si tenga conto che tutte le turbine eoliche sono dotate di un complesso sistema parafulmine, e per quanto riguarda l’urto non è pensabile potersi tutelare da un incidente, quale un velivolo o altro, che impatta sul rotore di una turbina o alla base della torre.

Riportando quanto scritto dalla BP POWER nel “Blade throw calculation under normal operating” “esperienze basate su dati reali (su una casistica di 1578 casi) fino all’agosto del 2006 hanno dimostrato che nel caso di distacco della pala o parti di essa l’unico moto che si è registrato è stato un moto di completa rotazione e che le distanze percorse lungo il moto sono risultate sempre inferiori alle lunghezze riportate nella relazione. Il distacco delle parti, in genere piccole, dovuto a guasti causati da eventi eccezionali (quali la straordinaria energia prodotta da un fulmine) ha portato nel peggiore dei casi, a ritrovare le parti stesse a distanze non superiori ai 40-50 metri dalla base della torre.”

TABULATI DI CALCOLO:

Angolo di Lancio

30°

tp s	Xp m	$\omega p$ °	Zp m
0,00	-35,83	30,00	176,1
0,10	-29,97	29,28	179,4
0,20	-24,17	28,53	182,6
0,30	-18,43	27,77	185,7
0,40	-12,74	26,99	188,6
0,50	-7,12	26,19	191,4
0,60	-1,56	25,37	194,1
0,70	3,95	24,54	196,7
0,80	9,40	23,68	199,1
0,90	14,78	22,79	201,4
1,00	20,11	21,89	203,6
1,10	25,38	20,97	205,7
1,20	30,60	20,02	207,6
1,30	35,75	19,05	209,5
1,40	40,85	18,06	211,2
1,50	45,88	17,05	212,8
1,60	50,86	16,01	214,3
1,70	55,78	14,95	215,6
1,80	60,65	13,87	216,9
1,90	65,45	12,76	218,0
2,00	70,20	11,63	219,0
2,10	74,89	10,47	219,9
2,20	79,52	9,29	220,8
2,30	84,09	8,09	221,5
2,40	88,60	6,87	222,0
2,50	93,06	5,62	222,5
2,60	97,46	4,36	222,9
2,70	101,80	3,07	223,2
2,80	106,09	1,76	223,4
2,90	110,32	0,43	223,5
3,00	114,49	-0,92	223,4
3,10	118,60	-2,28	223,3
3,20	122,66	-3,67	223,1
3,30	126,66	-5,06	222,8
3,40	130,60	-6,47	222,4
3,50	134,49	-7,90	221,9
3,60	138,32	-9,33	221,3
3,70	142,09	-10,78	220,7
3,80	145,81	-12,23	219,9
3,90	149,48	-13,68	219,1

4,00	153,09	-15,14	218,1
4,10	156,64	-16,61	217,1
4,20	160,15	-18,07	216,0
4,30	163,59	-19,53	214,9
4,40	166,99	-20,99	213,6
4,50	170,33	-22,44	212,3
4,60	173,62	-23,88	210,9
4,70	176,86	-25,32	209,4
4,80	180,05	-26,74	207,8
4,90	183,18	-28,15	206,2
5,00	186,27	-29,55	204,5
5,10	189,31	-30,93	202,7
5,20	192,30	-32,29	200,9
5,30	195,25	-33,63	199,0
5,40	198,14	-34,96	197,0
5,50	200,99	-36,26	195,0
5,60	203,80	-37,54	192,9
5,70	206,56	-38,80	190,7
5,80	209,27	-40,04	188,5
5,90	211,97	-41,24	186,1
6,00	214,64	-42,40	183,7
6,10	217,30	-43,54	181,3
6,20	219,93	-44,64	178,7
6,30	222,54	-45,71	176,1
6,40	225,14	-46,74	173,4
6,50	227,72	-47,75	170,6
6,60	230,28	-48,72	167,7
6,70	232,82	-49,67	164,8
6,80	235,35	-50,58	161,8
6,90	237,86	-51,47	158,6
7,00	240,36	-52,32	155,5
7,10	242,84	-53,15	152,2
7,20	245,31	-53,96	148,9
7,30	247,76	-54,74	145,4
7,40	250,20	-55,49	141,9
7,50	252,62	-56,22	138,4
7,60	255,04	-56,93	134,7
7,70	257,44	-57,61	131,0
7,80	259,83	-58,27	127,2
7,90	262,20	-58,98	123,3
8,00	264,57	-59,72	119,3
8,10	266,93	-60,50	115,2
8,20	269,27	-61,29	111,0
8,30	271,61	-62,11	106,6
8,40	273,93	-62,94	102,1

8,50	276,25	-63,77	97,5
8,60	278,56	-64,61	92,7
8,70	280,86	-65,45	87,8
8,80	283,15	-66,27	82,7
8,90	285,44	-67,09	77,4
9,00	287,72	-67,89	71,9
9,10	290,00	-68,68	66,2
9,20	292,26	-69,45	60,2
9,30	294,53	-70,19	54,1
9,40	296,78	-70,92	47,7
9,50	299,04	-71,62	41,0
9,60	301,29	-72,30	34,1
9,70	303,53	-72,96	26,9
9,80	305,77	-73,59	19,5
9,90	308,01	-74,20	11,7
10,05	311,25	-75,03	0,0

Angolo di Lancio

35°

tp s	Xp m	$\omega p$ °	Zp m
0,00	-41,11	35,00	172,7
0,10	-35,52	34,32	176,6
0,20	-30,00	33,62	180,3
0,30	-24,53	32,90	183,9
0,40	-19,11	32,16	187,3
0,50	-13,76	31,40	190,7
0,60	-8,45	30,63	193,8
0,70	-3,21	29,83	196,9
0,80	1,98	29,00	199,8
0,90	7,11	28,16	202,6
1,00	12,19	27,29	205,3
1,10	17,21	26,40	207,8
1,20	22,17	25,49	210,2
1,30	27,08	24,55	212,5
1,40	31,94	23,58	214,7
1,50	36,73	22,59	216,7
1,60	41,47	21,57	218,7
1,70	46,16	20,53	220,5
1,80	50,79	19,45	222,2
1,90	55,36	18,35	223,7
2,00	59,88	17,23	225,2
2,10	64,34	16,07	226,5
2,20	68,74	14,88	227,7
2,30	73,09	13,67	228,8
2,40	77,39	12,43	229,8

2,50	81,62	11,16	230,7
2,60	85,80	9,86	231,5
2,70	89,93	8,53	232,2
2,80	93,99	7,17	232,7
2,90	98,00	5,79	233,2
3,00	101,96	4,38	233,5
3,10	105,85	2,94	233,8
3,20	109,70	1,48	233,9
3,30	113,48	0,00	234,0
3,40	117,21	-1,51	233,9
3,50	120,88	-3,04	233,8
3,60	124,50	-4,59	233,5
3,70	128,06	-6,15	233,2
3,80	131,56	-7,73	232,8
3,90	135,01	-9,33	232,3
4,00	138,40	-10,93	231,6
4,10	141,74	-12,55	231,0
4,20	145,02	-14,17	230,2
4,30	148,25	-15,79	229,3
4,40	151,42	-17,42	228,4
4,50	154,54	-19,05	227,3
4,60	157,61	-20,67	226,2
4,70	160,62	-22,28	225,0
4,80	163,58	-23,89	223,8
4,90	166,49	-25,48	222,4
5,00	169,37	-27,05	221,0
5,10	172,22	-28,59	219,5
5,20	175,05	-30,10	217,9
5,30	177,85	-31,58	216,3
5,40	180,63	-33,03	214,5
5,50	183,38	-34,44	212,7
5,60	186,10	-35,82	210,7
5,70	188,80	-37,17	208,7
5,80	191,48	-38,48	206,7
5,90	194,13	-39,75	204,5
6,00	196,77	-40,99	202,3
6,10	199,38	-42,19	199,9
6,20	201,97	-43,36	197,6
6,30	204,54	-44,50	195,1
6,40	207,09	-45,60	192,5
6,50	209,62	-46,66	189,9
6,60	212,13	-47,70	187,2
6,70	214,62	-48,70	184,4
6,80	217,10	-49,67	181,5
6,90	219,56	-50,61	178,6

7,00	222,00	-51,52	175,6
7,10	224,43	-52,40	172,4
7,20	226,84	-53,25	169,3
7,30	229,24	-54,07	166,0
7,40	231,62	-54,87	162,7
7,50	233,99	-55,64	159,3
7,60	236,35	-56,38	155,8
7,70	238,69	-57,10	152,2
7,80	241,02	-57,80	148,5
7,90	243,34	-58,54	144,8
8,00	245,65	-59,33	141,0
8,10	247,94	-60,14	137,0
8,20	250,23	-60,97	133,0
8,30	252,50	-61,83	128,8
8,40	254,76	-62,70	124,5
8,50	257,02	-63,57	120,1
8,60	259,27	-64,44	115,4
8,70	261,50	-65,31	110,7
8,80	263,73	-66,17	105,7
8,90	265,96	-67,01	100,6
9,00	268,17	-67,84	95,3
9,10	270,38	-68,66	89,7
9,20	272,59	-69,45	84,0
9,30	274,79	-70,21	78,0
9,40	276,98	-70,96	71,7
9,50	279,17	-71,68	65,3
9,60	281,35	-72,37	58,5
9,70	283,53	-73,04	51,5
9,80	285,71	-73,69	44,2
9,90	287,88	-74,30	36,7
10,00	290,05	-74,90	28,8
10,10	292,22	-75,46	20,6
10,20	294,38	-76,01	12,1
10,34	297,32	-76,70	0,0

Angolo di Lancio

40°

tp s	Xp m	$\omega p$ °	Zp m
0,00	-46,07	40,00	168,9
0,10	-40,80	39,37	173,3
0,20	-35,59	38,72	177,5
0,30	-30,44	38,05	181,6
0,40	-25,34	37,36	185,5
0,50	-20,29	36,65	189,3
0,60	-15,29	35,92	193,0

0,70	-10,34	35,16	196,5
0,80	-5,45	34,39	199,9
0,90	-0,62	33,59	203,2
1,00	4,17	32,77	206,3
1,10	8,90	31,92	209,3
1,20	13,58	31,05	212,2
1,30	18,21	30,15	214,9
1,40	22,78	29,22	217,5
1,50	27,30	28,26	220,0
1,60	31,77	27,28	222,4
1,70	36,19	26,26	224,6
1,80	40,55	25,22	226,7
1,90	44,85	24,14	228,7
2,00	49,11	23,03	230,5
2,10	53,31	21,89	232,3
2,20	57,46	20,71	233,9
2,30	61,55	19,50	235,4
2,40	65,59	18,25	236,8
2,50	69,57	16,97	238,0
2,60	73,50	15,65	239,2
2,70	77,37	14,30	240,2
2,80	81,19	12,91	241,1
2,90	84,96	11,48	241,9
3,00	88,67	10,02	242,6
3,10	92,32	8,52	243,2
3,20	95,92	6,99	243,7
3,30	99,46	5,42	244,1
3,40	102,95	3,82	244,4
3,50	106,38	2,19	244,6
3,60	109,75	0,52	244,7
3,70	113,07	-1,17	244,6
3,80	116,33	-2,89	244,5
3,90	119,53	-4,64	244,3
4,00	122,68	-6,41	244,0
4,10	125,77	-8,20	243,6
4,20	128,81	-10,00	243,1
4,30	131,79	-11,82	242,6
4,40	134,72	-13,65	241,9
4,50	137,61	-15,47	241,1
4,60	140,47	-17,28	240,3
4,70	143,30	-19,07	239,4
4,80	146,09	-20,85	238,4
4,90	148,86	-22,60	237,3
5,00	151,59	-24,33	236,1
5,10	154,30	-26,03	234,8

5,20	156,97	-27,71	233,4
5,30	159,62	-29,35	232,0
5,40	162,23	-30,95	230,5
5,50	164,82	-32,52	228,9
5,60	167,38	-34,06	227,2
5,70	169,92	-35,55	225,4
5,80	172,42	-37,01	223,6
5,90	174,91	-38,42	221,7
6,00	177,36	-39,80	219,7
6,10	179,80	-41,14	217,6
6,20	182,21	-42,43	215,4
6,30	184,60	-43,69	213,2
6,40	186,96	-44,91	210,9
6,50	189,31	-46,08	208,5
6,60	191,63	-47,22	206,1
6,70	193,94	-48,32	203,5
6,80	196,22	-49,39	200,9
6,90	198,49	-50,42	198,2
7,00	200,74	-51,41	195,4
7,10	202,97	-52,37	192,6
7,20	205,19	-53,29	189,7
7,30	207,39	-54,19	186,7
7,40	209,57	-55,05	183,6
7,50	211,74	-55,88	180,4
7,60	213,90	-56,69	177,2
7,70	216,04	-57,46	173,9
7,80	218,16	-58,21	170,5
7,90	220,28	-58,93	167,1
8,00	222,38	-59,63	163,5
8,10	224,47	-60,31	159,9
8,20	226,55	-61,02	156,2
8,30	228,61	-61,77	152,4
8,40	230,67	-62,55	148,5
8,50	232,71	-63,35	144,5
8,60	234,75	-64,16	140,4
8,70	236,78	-64,99	136,1
8,80	238,79	-65,82	131,7
8,90	240,80	-66,64	127,2
9,00	242,80	-67,46	122,4
9,10	244,80	-68,27	117,5
9,20	246,78	-69,06	112,4
9,30	248,77	-69,84	107,1
9,40	250,74	-70,60	101,7
9,50	252,71	-71,33	95,9
9,60	254,67	-72,05	90,0

9,70	256,63	-72,74	83,8
9,80	258,59	-73,40	77,4
9,90	260,54	-74,04	70,7
10,00	262,49	-74,66	63,8
10,10	264,43	-75,25	56,5
10,20	266,37	-75,82	49,0
10,30	268,31	-76,36	41,2
10,40	270,24	-76,88	33,0
10,50	272,17	-77,38	24,6
10,60	274,10	-77,86	15,8
10,70	276,03	-78,31	6,7
10,77	277,39	-78,62	0,0

Angolo di Lancio

45°

tp s	Xp m	$\omega p$ °	Zp m
0,00	-50,68	45,00	164,7
0,10	-45,78	44,42	169,5
0,20	-40,93	43,82	174,2
0,30	-36,13	43,21	178,8
0,40	-31,37	42,57	183,2
0,50	-26,67	41,92	187,5
0,60	-22,02	41,24	191,6
0,70	-17,42	40,54	195,6
0,80	-12,86	39,82	199,4
0,90	-8,36	39,08	203,1
1,00	-3,90	38,31	206,7
1,10	0,51	37,52	210,1
1,20	4,86	36,70	213,4
1,30	9,17	35,85	216,6
1,40	13,43	34,97	219,6
1,50	17,64	34,07	222,5
1,60	21,80	33,13	225,3
1,70	25,91	32,16	227,9
1,80	29,97	31,16	230,4
1,90	33,97	30,12	232,8
2,00	37,93	29,04	235,0
2,10	41,84	27,93	237,2
2,20	45,70	26,78	239,2
2,30	49,50	25,59	241,0
2,40	53,25	24,36	242,8
2,50	56,96	23,09	244,4
2,60	60,61	21,77	245,9
2,70	64,20	20,41	247,3
2,80	67,75	19,01	248,6

2,90	71,24	17,56	249,7
3,00	74,67	16,06	250,8
3,10	78,06	14,51	251,7
3,20	81,39	12,92	252,5
3,30	84,66	11,28	253,2
3,40	87,88	9,59	253,8
3,50	91,04	7,85	254,3
3,60	94,15	6,07	254,7
3,70	97,20	4,24	254,9
3,80	100,21	2,39	255,1
3,90	103,20	0,50	255,2
4,00	106,15	-1,40	255,2
4,10	109,07	-3,32	255,0
4,20	111,95	-5,26	254,8
4,30	114,80	-7,21	254,5
4,40	117,61	-9,17	254,1
4,50	120,39	-11,13	253,6
4,60	123,14	-13,08	253,0
4,70	125,85	-15,04	252,3
4,80	128,53	-16,98	251,6
4,90	131,17	-18,90	250,7
5,00	133,78	-20,81	249,8
5,10	136,35	-22,69	248,8
5,20	138,89	-24,55	247,6
5,30	141,40	-26,37	246,4
5,40	143,88	-28,17	245,2
5,50	146,32	-29,92	243,8
5,60	148,74	-31,64	242,4
5,70	151,12	-33,32	240,9
5,80	153,48	-34,95	239,3
5,90	155,80	-36,54	237,6
6,00	158,10	-38,09	235,8
6,10	160,38	-39,59	234,0
6,20	162,62	-41,04	232,1
6,30	164,84	-42,45	230,1
6,40	167,04	-43,81	228,1
6,50	169,21	-45,13	225,9
6,60	171,36	-46,40	223,7
6,70	173,49	-47,63	221,4
6,80	175,60	-48,81	219,1
6,90	177,68	-49,96	216,6
7,00	179,75	-51,06	214,1
7,10	181,80	-52,12	211,5
7,20	183,83	-53,14	208,9
7,30	185,84	-54,12	206,2

7,40	187,83	-55,07	203,3
7,50	189,81	-55,98	200,5
7,60	191,77	-56,85	197,5
7,70	193,72	-57,70	194,5
7,80	195,65	-58,51	191,4
7,90	197,57	-59,29	188,2
8,00	199,47	-60,04	184,9
8,10	201,36	-60,77	181,6
8,20	203,24	-61,47	178,2
8,30	205,11	-62,14	174,7
8,40	206,96	-62,79	171,2
8,50	208,81	-63,47	167,5
8,60	210,64	-64,19	163,8
8,70	212,46	-64,93	160,0
8,80	214,27	-65,69	156,0
8,90	216,08	-66,47	152,0
9,00	217,87	-67,25	147,8
9,10	219,66	-68,03	143,4
9,20	221,44	-68,80	138,9
9,30	223,21	-69,57	134,2
9,40	224,97	-70,33	129,4
9,50	226,73	-71,07	124,4
9,60	228,48	-71,79	119,2
9,70	230,23	-72,49	113,8
9,80	231,97	-73,18	108,1
9,90	233,71	-73,84	102,2
10,00	235,44	-74,47	96,1
10,10	237,17	-75,08	89,8
10,20	238,89	-75,67	83,2
10,30	240,61	-76,24	76,3
10,40	242,33	-76,78	69,1
10,50	244,05	-77,30	61,7
10,60	245,76	-77,79	53,9
10,70	247,47	-78,27	45,9
10,80	249,17	-78,72	37,5
10,90	250,88	-79,15	28,8
11,00	252,58	-79,56	19,7
11,10	254,28	-79,95	10,3
11,21	256,06	-80,34	0,0

# Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento

## Indice

1	Introduzione.....	2
2	Risultati.....	3
3	Metodologia e ipotesi.....	4
4	Velocità di rotazione.....	5
5	Forze agenti sulla traiettoria pala .....	6
6	Caratteristiche della pala.....	7
7	Casi di studio .....	8
7.1	Caso 1: Moto irrotazionale.....	8
7.2	Caso 2: Moto irrotazionale.....	8
7.3	Caso 3: Moto rotazionale complesso.....	8
8	Esperienze e note statistiche .....	10
8.1	Distacco di una delle pale dal rotore.....	10
8.2	Rottura (apertura) dell'estremità di pala.....	12
9	Conclusioni.....	14
10	Riferimenti.....	15
11	Appendice .....	16

# 1 Introduzione

L'obiettivo di questo lavoro è determinare la distanza che una pala di un aerogeneratore raggiunge nel caso di distacco dal mozzo mentre la macchina è in funzione. Il calcolo è stato eseguito su otto aerogeneratori VESTAS:

- V80-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 39 m e una velocità di rotazione massima a regime di 20 RPM posto su una torre di altezza pari a 80 m;
- V90-1,8/2,0MW con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 17 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m;
- V90-3,0MW con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 18,4 RPM posto su una torre di altezza pari a 105 m;
- V100-1,8/2,0MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 16,6 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m;
- V100-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m;
- V100-2,6MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 13,38 RPM posto su una torre di altezza pari a 100 m;
- V110-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 54 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m (125 m);
- V112-3,0/3,3MW con una pala di lunghezza pari a 54,6 m e una velocità di rotazione massima a regime di 17,7 RPM posto su una torre di altezza pari a 94 m (119 m).
- V117-3,3MW con una pala di lunghezza pari a 57,15 m e una velocità di rotazione massima a regime di 17,7 RPM posto su una torre di altezza pari a 91.5 m (116.5 m).
- V126-3,3MW con una pala di lunghezza pari a 61,66 m e una velocità di rotazione massima a regime di 16,5 RPM posto su una torre di altezza pari a 117 m (137 m).

Per la pala della V80-2,0MW si è fatto uno studio completo ipotizzando tre condizioni: la prima, più conservativa, include solo le forze d'inerzia ed esclude le forze viscosi; la seconda include le forze viscosi; la terza considera il moto della pala completo. La prima condizione di carico è quella che dà la massima gittata, ma in realtà le forze di resistenza che si esercitano sulla pala fanno sì che la gittata reale sia inferiore di circa il 20%.

Per la pala V90-1,8/2,0MW, V90-3,0MW, V100-1,8/2,0MW, V100-2,0MW, V100-2.6MW, V110-2,0MW, V112-3,0/3,3MW, V117-3.3MW e V126-3.3MW si è fatto uno studio considerando la condizione più conservativa e cioè considerando le sole forze inerziali ed escludendo l'attrito, per cui i risultati ottenuti e mostrati di seguito nel paragrafo 2 sono da considerare del 20% maggiori di quelli reali.

## 2 Risultati

I risultati dell'analisi indicano che con lo studio più complesso (caso 3 riportato in seguito in questo documento) la gittata della pala per la V80-2,0MW (nel caso peggiore, ma non reale (caso 1) è 125 m) è di poco inferiore ai 100m.

La gittata della pala per la V90-1,8/2,0MW è di ca. 90 m, per la V90-3,0MW è di ca. 105 m, per la V100-1,8/2,0MW è di ca. 100 m, per la V100-2,0MW è di circa 85 m, per la V100-2,6MW è di circa 75 m, per la V110-2,0MW è di circa 95 m (100 m), per la V112-3,0/3,3MW è di ca. 120 m (135 m) e per la V117-3,3MW è di ca. 135 m (145 m) e infine per la V126-3,3MW è di ca. 140 m (150 m). Per le macchine appena menzionate l'unico caso studiato è quello conservativo, per cui il risultato è maggiore del 20% rispetto al reale.

### 3 Metodologia e ipotesi

Da un punto di vista teorico, se non si considerano le forze aerodinamiche la massima gittata si ottiene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di  $45^\circ$  ( $135^\circ$  in posizione azimutale). 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).

## 4 Velocità di rotazione

Si è ipotizzato che il distacco della pala dal rotore avvenga alla velocità di rotazione massima del “Dynamic Operation Range” della macchina.

Pertanto, la velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della pala sono le seguenti:

- V80-2,0MW è pari a 20 RPM;
- V90-1,8/2,0MW è pari a 17 RPM;
- V90-3,0MW è pari a 18,4 RPM;
- V100-1,8/2,0MW è pari a 16,6 RPM;
- V100-2,0MW è pari a 14,9 RPM;
- V100-2,6MW è pari a 13,38 RPM;
- V110-2,0MW è pari a 14,9 RPM;
- V112-3,0/3,3MW è pari a 17,7 RPM.
- V117-3,3MW è pari a 17,7 RPM.
- V126-3,3MW è pari a 16,5 RPM.

## 5 Forze agenti sulla traiettoria pala

Le ipotesi fatte in questo studio considerano il caso peggiore, esso avviene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di  $45^\circ$  sul piano verticale (cioè  $135^\circ$  azimut). La determinazione delle forze e dei momenti agenti sulla pala a causa di una rottura istantanea durante il moto rotazionale è molto complessa. La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate inerziali agenti sulla pala. Queste includono anche, per esempio, oltre all'impulso anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise agenti al momento del distacco. La pala, quindi, quando inizierà il suo moto continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto). L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità. La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano. La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco. Le forze inerziali sono modellate considerando un flusso irrotazionale e stazionario.

## 6 Caratteristiche della pala

Le caratteristiche delle pale, input della simulazione, sono riportate in tabella.

WTG type	(Outboard) Section of blade	Plan area Plane XY m <sup>2</sup>	Plan area Plane XZ m <sup>2</sup>	Plan area Plane YZ m <sup>2</sup>	Mass kg
V80-2,0MW	39	81,46	22,8	2,38	6300
V90-1,8/2,0MW	44	87,84	25,69	2,37	6700
V90-3,0MW	44	87,84	25,69	2,37	6700
V100-1,8/2,0MW	49	-	-	-	7700
V100-2,0MW	49	-	-	-	-
V100-2,6MW	49	-	-	-	7700
V110-2,0MW	54	-	-	-	-
V112-3,0/3,3MW	54,6	-	-	-	12300
V117-3,3MW	57,15	-	-	-	-
V126-3,3MW	61,66	-	-	-	-

## 7 Casi di studio

Tutte le condizioni di rottura sono state assunte avvenire quando il rotore è in posizione upwind e con una velocità del vento pari a 25m/s. Questa condizione è anch'essa conservativa in quanto dà la massima gittata fuori dal piano. Sono state calcolate tre traiettorie nelle seguenti ipotesi:

### 7.1 CASO 1: MOTO IRROTAZIONALE

Assenza di moti intorno agli assi XX, YY e ZZ. L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano verticale. Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi:

- Nessuna forza di portanza agisce nella direzione in-plane;
- La massima resistenza è generata nella direzione out-of-plane;
- La resistenza nel piano agisce sulla sezione nel piano XZ.

### 7.2 CASO 2: MOTO IRROTAZIONALE

L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano orizzontale. Quando la pala ha raggiunto questa posizione non ci sono ulteriori moti intorno agli assi XX, YY e ZZ.. In questo caso la traiettoria risultante è del tipo "a giavellotto". Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il caso teorico peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi:

- La traiettoria in alto è aumentata dalla forza di portanza generata dalla pala, per cui la gittata è maggiore che in assenza di portanza.

Tre casi sono stati modellati:

- Caso 2a. L'effetto della portanza sul tempo di volo è zero. La soluzione (approssimata) per questo è data dal caso 1 solo nella direzione in-plane.
- Caso 2b. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%.
- Caso 2c. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%, in questo caso si ottiene il maggior tempo di volo.

### 7.3 CASO 3: MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO

In questo caso si studia il moto della pala al distacco del rotore nel suo complesso considerando anche i moti di rotazione intorno agli assi XX, YY e ZZ. Questo caso è il caso più reale della traiettoria di una pala. La rotazione della pala intorno all'asse ZZ è causata dalla conservazione del momento della quantità di moto. L'incidenza del vento out-of-plane sulla pala genera un momento intorno all'asse YY (centro di massa e centro aerodinamico della pala non sono coincidenti). Il vento incidente out-of-plane sulla pala genera ancora un momento intorno all'asse XX (centro di massa della sezione di pala lungo la corda non coincide con il centro aerodinamico). La resistenza della pala sia in-plane che out-of-plane è generata dalla rotazione intorno agli assi XX e YY. Per semplificare lo studio si è assunta l'area della pala pari alla stessa in direzione XY

moltiplicata per il quadrato del coseno di  $45^\circ$ . La portanza in-plane è generata dalla rotazione intorno al piano XX. In questo caso si è assunto un aumento del 10% del tempo di volo dovuto alla portanza.

Tre casi sono stati modellati per tener conto dell'effettivo valore della resistenza:

- Caso 3a.  $C_d$  (in-plane e out-of-plane) = 0,5
- Caso 3b.  $C_d$  (in-plane e out-of-plane) = 1,0
- Caso 3c.  $C_d$  (in-plane e out-of-plane) = 1,5

## 8 Esperienze e note statistiche

E' necessario enfatizzare che dal punto di vista progettuale la combinazione di coefficienti di sicurezza per i carichi, i materiali utilizzati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura rispettano quanto prescritto dalla norma IEC61400-1. In accordo a tale norma le pale degli aerogeneratori sono considerate "fail safe".

Questo paragrafo è stato redatto al fine di presentare alcuni degli elementi fondamentali per valutare la reale possibilità del distacco di una pala dagli aerogeneratori Vestas.

L'esperienza pratica su tutta la flotta operativa (relativa alle sole turbine considerate nel presente report) di 15679 unità ha mostrato che in caso di distacco di pala il moto è stato di tipo "rotazionale complesso" e le distanze raggiunte sono normalmente state inferiori a quelle stimate con i calcoli semplificati qui riportati.

Eventi di distacco di una sezione di pala non si sono verificati a tutt'oggi sulle turbine installate per i modelli considerati nel presente report.

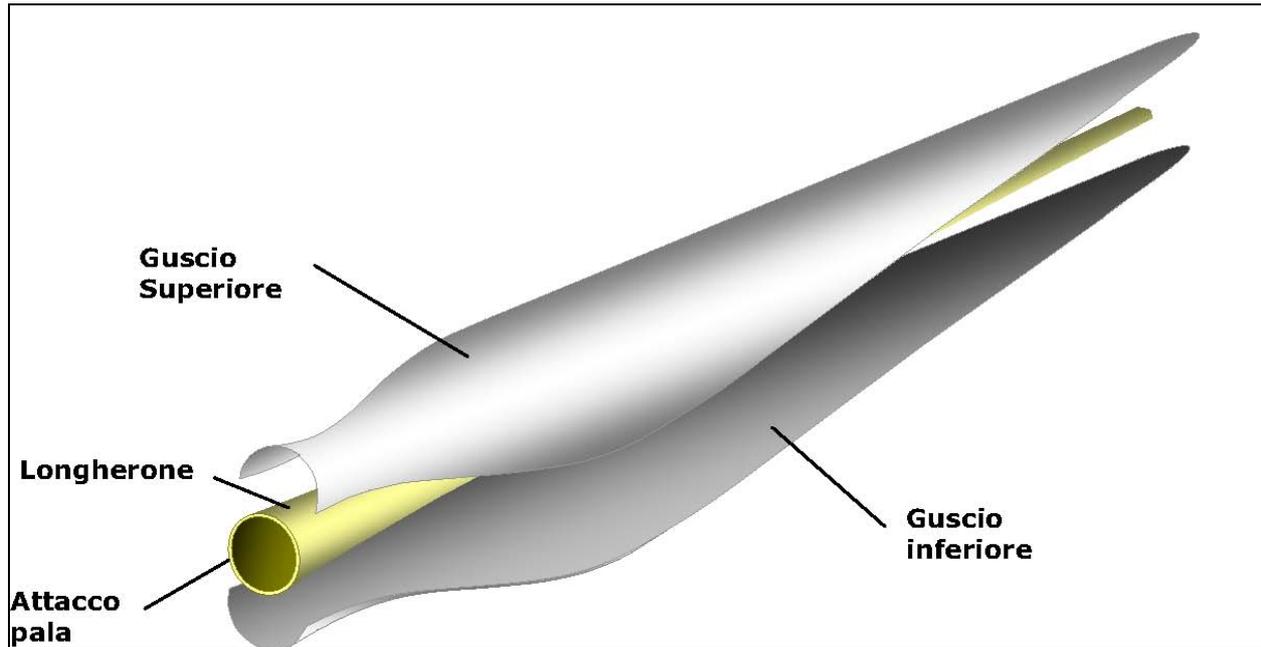
Tralasciando gli incidenti dovuti a cause eccezionali (uragani, tifoni), nei successivi paragrafi sono descritti alcuni eventi e la valutazione tecnica alla base dell'analisi dei rischi sviluppata per eliminare la possibilità di reiterazione dell'incidente.

### 8.1 DISTACCO DI UNA DELLE PALE DAL ROTORE

Questo tipo d'incidente, che comporta il distacco di una pala completa dal rotore dell'aerogeneratore, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala e il mozzo.

In occasione di tali tipi di evento, la pala ha raggiunto il terreno a una distanza inferiore ai cento metri.

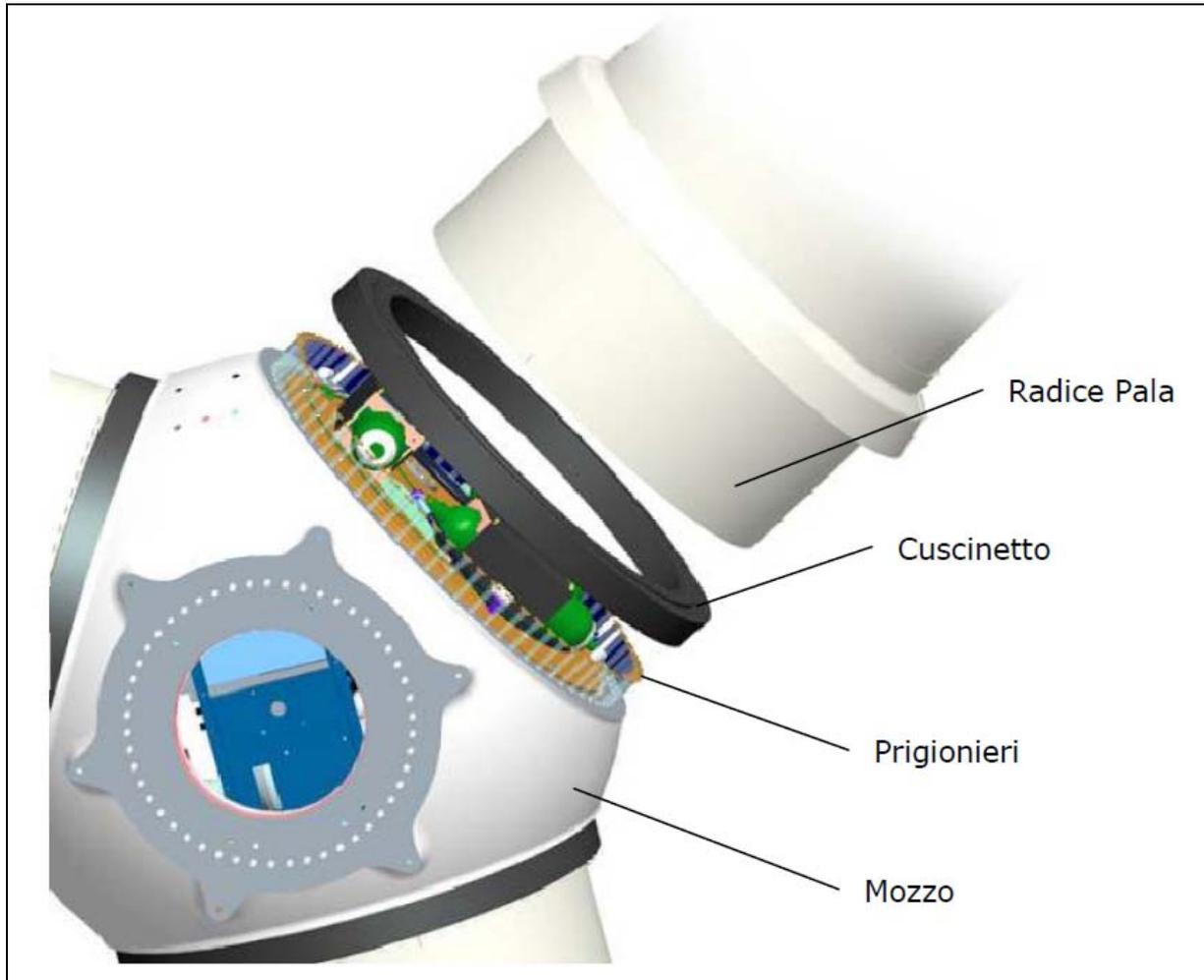
Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posta all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente la funzione di forma del profilo. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono unite fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.



**Figura 1: Schema strutturale di una pala eolica**

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri 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'evento si è manifestato a causa di incorretti interventi di manutenzione programmata cui l'aerogeneratore va sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore: l'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono aver determinato la rottura per fatica dei prigionieri ed al distacco della pala.



**Figura 2: Dettagli dell'attacco di una pala al mozzo.**

## 8.2 ROTTURA (APERTURA) DELL'ESTREMITÀ DI PALA

Questo tipo d'incidente si è spesso manifestato in concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica.

Tutte le pale prodotte dalla Vestas sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine costituito da recettori metallici posti all'estremità di pala e lungo l'apertura della 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 di pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala.

Eventuali residui o frammenti di guscio dovuti a un evento ceraunico hanno dimensioni e pesi così esigui da non permettere valutazioni circa eventuali traiettorie e gittate. Queste sono comunque determinate quasi esclusivamente dal trasporto degli stessi ad opera del vento.

**Vestas Italia S.r.l.**

Via Tirso 14, 00198 Roma, Italy  
Tel: +39 099 4606 111, Fax: +39 099 4606 333, vestas-italia@vestas.com, www.vestas.com  
Capital share: EUR 3,000,000.00 i.v., Company Reg. No.: 02170340737 presso il Registro Imprese di Roma N., REA 1192488  
C.F./P.IVA 02170340737, Company Reg. Name: Vestas Italia S.r.l.  
Società a socio unico soggetta a direzione e coordinamento di Vestas Wind Systems A/S ex c.c. artt. 2497 ss  
Company with a sole quota holder subject to direction & coordination of Vestas Wind Systems A/S per Article 2497 ff. of the Italian Civil Code



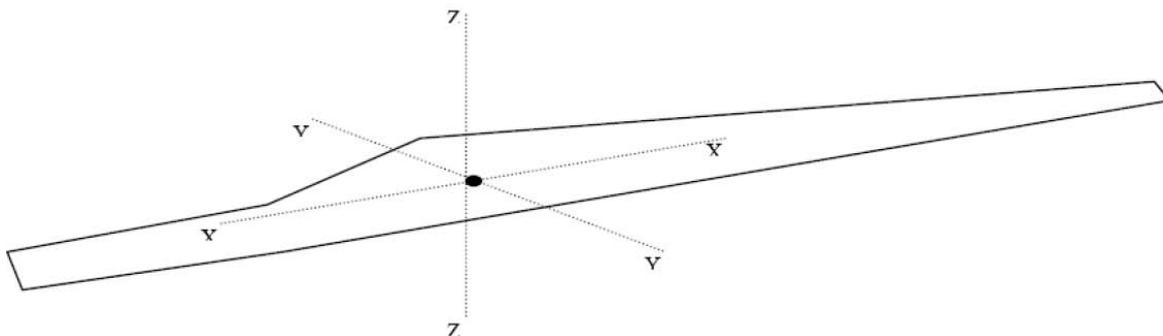
**Figura 3: Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica.**

## 9 Conclusioni

I Casi 1, 2a, 2b e 2c dimostrano che, se la traiettoria di volo è ‘irrotazionale’, allora la distanza raggiunta dalla pala da 39 m (V80-2,0MW) sarà di ca. 125 m, dalla pala da 44m (V90-1,8/2,0MW) sarà di ca. 90 m, dalla pala da 44 m (V90-3,0MW) sarà di ca. 105 m, dalla pala da 49m (V100-1,8/2,0MW) sarà di ca.100 m, dalla pala da 49m (V100-2,0MW) sarà di ca.85 m, dalla pala da 49 m (V100-2,6MW) sarà di ca. 75 m, dalla pala da 54m (V110-2,0MW) sarà di ca.95 m (100 m), dalla pala da 54.6m (V112 3,0/3,3 MW) sarà di ca. 120 m (135 m), dalla pala da 57,15m (V117-3,0MW) sarà di ca. 135 m (145 m) mentre dalla pala da 61,66 m (V126-3,3 MW) sarà ca. 140 m (150 m) . Il caso peggiore per la gittata è il caso 1 (2a) per il tempo invece è il 2c. Il Caso 3 mostra che, quando il flusso è rotazionale, la distanza raggiunta dalla pala sarà di ca. 99.6m per la V80-2,0MW.

Il caso reale da considerare è il caso 3 per cui si può concludere che la gittata di una pala di una V80-2,0MW (39 m di lunghezza) è di ca. 99.6m, di una V90-1.8/2.0MW (44 m di lunghezza) sarà di ca. 75 m, di una V90-3,0MW (44 m di lunghezza) sarà di ca. 85 m, di una V100-1,8/2,0MW (49 m di lunghezza) sarà di ca. 80 m, di una V100-2,0MW (49 m di lunghezza) sarà di ca. 70 m, di una V100-2.6MW (49 m di lunghezza) sarà di ca. 60, di una V110-2,0MW (54 m di lunghezza) sarà di ca. 75 m (80 m), di una V112-3,0/3,3MW (54,6 m di lunghezza) sarà di ca. 95 m (110m) e di una V117-3,3MW (57,15 m di lunghezza) sarà di ca. 110 m (115 m) e di una V126-3,3MW (61,66 m di lunghezza) sarà di ca. 115m (120 m) (20% in meno della gittata nel caso ideale, caso 1).

Dalle note operative espone si può concludere che ha senso effettuare un calcolo di gittata della pala intera in quanto esiste un punto di discontinuità, l’attacco bullonato che unisce la pala al mozzo, ed esiste un’ipotesi, seppur remota, sulla possibilità di cedimento di tale attacco. Mentre l’effetto di distacco di una porzione della pala è escluso, considerate le caratteristiche meccaniche della pala, ovvero, una struttura monolitica della trave di sostegno che rimane vincolata al mozzo attraverso una collegamento bullonato.



**Figura 4: Sistema di coordinate usato per la pala**  
(YY – Flapwise; XX – Pitchwise; ZZ – Edgewise)

## 10 Riferimenti

“Blade throw calculation under normal operating conditions” VESTAS AS Denmark July 2001

### **Vestas Italia S.r.l.**

Via Tirso 14, 00198 Roma, Italy  
Tel: +39 099 4606 111, Fax: +39 099 4606 333, [vestas-italia@vestas.com](mailto:vestas-italia@vestas.com), [www.vestas.com](http://www.vestas.com)  
Capital share: EUR 3,000,000.00 i.v., Company Reg. No.: 02170340737 presso il Registro Imprese di Roma N., REA 1192488  
C.F./P.IVA 02170340737, Company Reg. Name: Vestas Italia S.r.l.  
Società a socio unico soggetta a direzione e coordinamento di Vestas Wind Systems A/S ex c.c. artt. 2497 ss  
Company with a sole quota holder subject to direction & coordination of Vestas Wind Systems A/S per Article 2497 ff. of the Italian Civil Code

## 11 Appendice

Caso 3	Pala V80 2,0MW	Pala V90 1,8/2,0MW	Pala V90 3,0MW	Pala V100 1,8/2,0MW	Pala V100 2,0MW	Pala V100 2,6MW	Pala V110 2,0MW HH95	Pala V110 2,0MW HH125
Velocità di rotazione	20	17	18,4	16,6	14,9	13,4	14,9	14,9
Tempo di volo	7,6	7	7.5	7	6,5	7	6,5	7
Distanza Vettoriale	99,6	75	85	80	70	60	75	80

Caso 3	Pala V112 3,0/3,3MW HH94	Pala V112 3,0/3,3MW HH119	Pala V117 3,3MW HH91.5	Pala V117 3,3MW HH116,5	Pala V126 3,3MW HH117	Pala V126 3,3MW HH137
Velocità di rotazione	17,7	17,7	17,7	17,7	16,5	16,5
Tempo di volo	7	8	7,5	7,5	7,6	8,0
Distanza Vettoriale	95	110	110	115	115	120

Gli altri casi sono stati studiati solo per la V80-2,0MW quindi non sono rilevanti per il caso in questione.