



REGIONE BASILICATA

Comune principale impianto



COMUNE DI MONTEMILONE  
PROVINCIA DI POTENZA

Opere connesse



COMUNE DI VENOSA  
PROVINCIA DI POTENZA



COMUNE DI SPINAZZOLA  
PROVINCIA DI BAT



COMUNE DI BANZI  
PROVINCIA DI POTENZA



COMUNE DI GENZANO DI LUCANIA  
PROVINCIA DI POTENZA



COMUNE DI PALAZZO SAN GERVASIO  
PROVINCIA DI POTENZA



PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA, AI SENSI DEL D.LGS N. 387 DEL 2003, COMPOSTO DA N° 17 AEROGENERATORI, PER UNA POTENZA COMPLESSIVA DI 71.4 MW, SITO NEL COMUNE DI MONTEMILONE (PZ) E OPERE CONNESSE NEI COMUNI DI VENOSA (PZ), PALAZZO SAN GERVASIO (PZ), BANZI (PZ), GENZANO DI LUCANIA (PZ) E SPINAZZOLA (BT)

COD.REG	DESCRIZIONE	SCALA DI RAPP.
<b>A.7</b>	<b>Analisi degli effetti della rottura degli elementi rotanti - Verifica dei requisiti previsti dal PIEAR</b>	
COD. INT. <b>ELAB. 7</b>		



REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	REVISIONE
Arch. V. Furcolo Arch. M. Lombardi	Arch. M. Lombardi	Ing. G. Delli Priscoli Ing. G. De Masi	Revisione 0
			DATA
			11/2019

## Sommario

1	Premessa .....	2
2.	Equazioni del moto .....	3
2.1	Calcolo della velocità periferica.....	3
2.2	Studio del moto del proiettile mediante le equazioni della cinematica .....	4
3.	Gittata massima.....	5
4.	Calcolo della gittata massima. ....	7
5.	Conclusioni .....	11

## 1 Premessa

Lo scopo della presente relazione è quello di verificare, mediante un calcolo dettagliato, il rispetto dei requisiti di sicurezza in caso di distacco o rottura accidentale della blade, così come richiesto dall'Appendice A del PIEAR, della regione Basilicata, al par. 1.2.1.4.

La gittata massima di seguito rappresentata, riguarda la verifica rispetto alla realizzazione del campo eolico, sito in Montemilone (PZ), costituito da n°17 aerogeneratori, che genererà una potenza complessiva di 71,4MW.

Il modello di turbina preso in esame, che ha un diametro di 75 m e un'altezza hub di 105 m, è del tipo Vestas V150 e ha una potenza di 4,2 MW.

Si precisa che lo studio viene redatto applicando una metodologia di calcolo che abbia rigore scientifico e che consideri tutti i possibili effetti, meccanici ed aerodinamici, che potrebbero influenzare la distanza di gittata della pala.

Nel calcolo, si considerano, a vantaggio di sicurezza, le condizioni più sfavorevoli in cui si possa verificare il distacco della pala dell'aerogeneratore. Nella fattispecie, sarà preso in considerazione l'ipotesi di distacco dell'intera blade, ipotizzando il cedimento dell'attacco bullonato tra la blade e il mozzo.

## 2. Equazioni del moto

La procedura seguita per il calcolo della gittata massima, nell'ipotesi di distacco accidentale dell'intera blade dell'aerogeneratore di progetto, si basa sull'equazioni di moto del proiettile. Il calcolo considera le condizioni più gravose al contorno, in modo da aumentare il grado di sicurezza. Per tale motivo si considera nullo l'effetto dell'attrito con l'aria.

Nel caso in esame (tipologia Vestas V150) sono state considerate le seguenti caratteristiche dell'aerogeneratore:

Diametro Rotore [m] 150

Altezza del mozzo [m] 105

Inclinazione asse rotore [°] 4,0

Potenza nominale [MW] 4.2

Velocità rotore nominale[rpm] 12

Velocità di Cut-in [m/s] 3

Velocità di Cut-out [m/s] 24,5

Il moto del proiettile è la composizione di due moti: uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale, e uno uniformemente accelerato (con accelerazione modulo  $g$ ) in direzione verticale.

La gittata è la distanza tra il punto in cui viene lanciato un proiettile (con velocità iniziale inclinata verso l'alto rispetto all'orizzontale) e il punto in cui esso ritorna al suolo.

### 2.1 Calcolo della velocità periferica

Per il calcolo della gittata, elemento fondamentale è rappresentato dalla velocità angolare media  $w$  ovvero l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo.

Tale velocità è data dal  $n$  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  $2\pi$  radianti, per  $n$  giri avremo  $2\pi n$  radianti/minuto, ovvero la velocità angolare  $w$  al minuto del corpo in movimento.

Pertanto la velocità angolare è dato da:

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

Mentre la velocità periferica in metri al secondo di un corpo rotante, considerando la velocità massima del rotore di 13 giri al minuto, corrisponde a:

$$V_g = \omega r_g = \frac{2\pi n}{60} r_g = 34,02 \text{ m/sec}$$

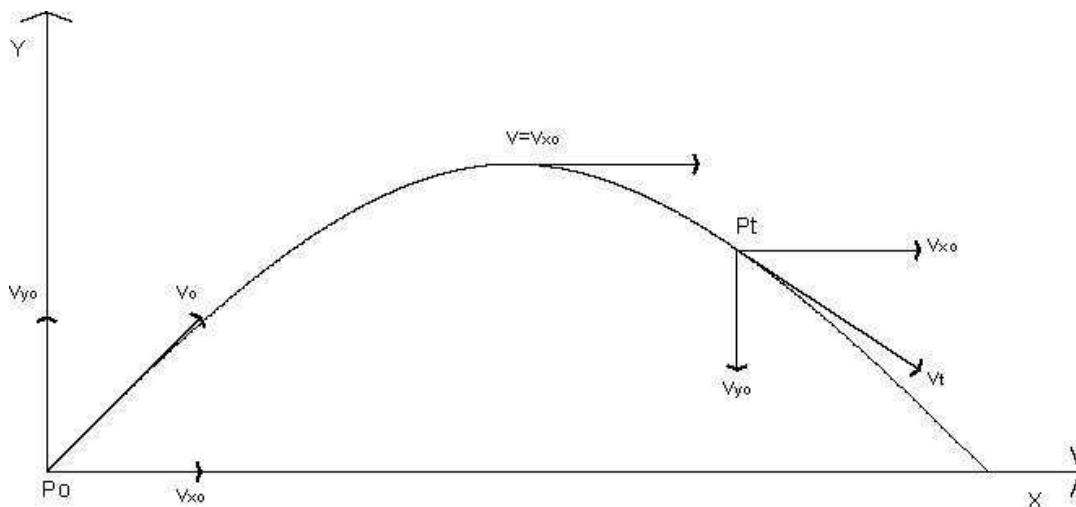
## 2.2 Studio del moto del proiettile mediante le equazioni della cinematica

Considereremo inizialmente il moto bidimensionale di un proiettile, come il moto di un punto materiale, 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.

Sceglieremo un sistema di riferimento con l'origine degli assi O centrata nel punto di partenza del corpo  $(x_0, y_0)$ , con l'asse delle Y positivo verso l'alto, e l'asse positivo delle X nello stesso verso del moto orizzontale del proiettile; le componenti dell'accelerazione saranno:

$$a_x = 0 \quad a_y = -g$$

Rappresenteremo la legge di caduta di un grave, ovvero di un punto materiale, lanciato nello spazio con velocità iniziale  $v_0$  e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di  $\theta$  come in figura:



Ricordando che:

$$a_x = 0 \quad a_y = g \text{ (dove } g = -9,81 \text{ m/sec}^2\text{)}$$

e considerando che:

Direzione x: il MOTO è RETTILINEO UNIFORME

Direzione y: il MOTO è UNIFORMEMENTE ACCELERATO

La velocità  $v_0$  ha componenti nelle due direzioni:

$$v_x = v_0 \cos \theta$$

$$v_y = v_0 \sin \theta$$

Da cui:

$$v_x = v_{x0}$$

$$x = x_0 + v_{x0}t$$

e

$$v_y = gt + v_{y0}$$

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

### 3. Gittata massima

La gittata è la distanza percorsa dal proiettile in direzione x prima di toccare terra.

Questo valore si trova imponendo che nella equazione:

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

sia nullo  $y$  determinando così l'istante  $t$  in cui avviene il transito (e in questo caso l'impatto) alla quota  $y = 0$  sarà:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0 = 0$$

Nell'ipotesi semplificativa che  $y_0 = 0$  si ottiene:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t = 0$$

da cui le due soluzioni:

$$t_0 = 0$$

$$t_1 = -\frac{2v_{y0}}{g} = -\frac{2v_0 \sin \theta}{g}$$

$t_0$  corrisponde all'istante di lancio del proiettile (abbiamo infatti ipotizzato per semplicità che  $y_0 = 0$ );  
 $t_1$  all'istante in cui il proiettile, avvenuto il lancio, tocca nuovamente terra. Sostituendo quest'ultimo  
valore nell'equazione  $x = x_0 + v_{x0}t$ , descrittiva del moto lungo  $x$ , si ricaverà il valore della gittata:

$$x = x_0 - 2 \frac{v_0^2}{g} \sin \theta \cos \theta$$

Ipotizzando per semplicità che

$$x_0 = 0$$

ed essendo

$$2 \sin \theta \cos \theta = \sin 2\theta$$

si può riscrivere la equazione per il calcolo della gittata come:

$$x = - \frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta$$

La gittata massima è così funzione del modulo della velocità iniziale, della ascissa e della quota iniziale  
di lancio (che in questo caso semplificato sono state considerate nulle), e di  $\theta$  angolo di inclinazione  
della gittata: in particolare essa sarà massima quando  $\sin 2\theta = 1$  cioè  $2\theta = \pi/2$  ossia  $\theta = \pi/4$ .

Nel caso in questione  $y_0$  non sarà uguale a zero, ma corrispondente alla quota del baricentro G del  
sistema ipotizzato rispetto alla quota del piano di campagna. Il baricentro G rappresenta il centro di  
rotazione della pala in caso di distacco.

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, ossia  $r_g = 25 \text{ m}$  a partire dal mozzo, essendo la lunghezza di ciascuna pala uguale a  
 $75 \text{ m}$ . L'oggetto che accidentalmente si distacca è pari alla lunghezza dell'intera blade fino all'attacco  
con il mozzo, e quindi è pari a  $75,00 \text{ m}$  con uno spessore variabile fino all'estremità della pala.

L'altezza di lancio sarà uguale a:

$$y_0 = H_{torre} + Y_g$$

Dove

$$Y_g = \frac{1}{3} r_g \cdot \sin \theta$$

Ciò implica che la soluzione di  $t$  sarà:

$$t = \frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4\left(\frac{1}{2}gy_0\right)}}{g}$$

tale valore andrà sostituito nell'equazione descrittiva del moto lungo  $x$ , per trovare la gittata massima.

#### 4. Calcolo della gittata massima.

Nel calcolo sono considerate le seguenti ipotesi:

- baricentro posizionato ad  $1/3$  della lunghezza della pala;
- assenza di attriti viscosi durante il volo;
- distacco alla rotazione di funzionamento massima;
- vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente a quella massima di funzionamento;
- assenza di effetti di “portanza” del profilo alare
- moto del sistema di tipo rigido non vincolato;
- trascurabili le forze di resistenza dell'aria ;
- le componenti dell'accelerazione saranno  $a_x = 0$ ,  $a_y = -g$ ;
- le coordinate del punto di partenza del corpo coincidenti con il punto di attacco bullonato blade-mozzo.

La risoluzione dell'equazione descrittiva del moto, nelle suddette condizioni, sarà quindi:

$$Gittata\ max = v_{x0} \cdot \frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4\left(\frac{1}{2}gH_G\right)}}{g}$$

Si riportano, nella tabella che segue, i valori più rappresentativi della gittata massima:



$\theta$ (°) Angolo di inclinazione	$\theta$ (rad)	$V_x = V_0 \times \cos\vartheta$	$V_y = v_0 \times \sin\vartheta$	$H_g = (h \text{ torre} + y_g)$ $y_g = r_g \cdot \sin q$	Gittata effettiva
0	0,00	31,40	0,00	105,00	145,28
1	0,02	31,40	0,55	106,31	147,92
2	0,03	31,38	1,10	107,62	150,54
3	0,05	31,36	1,64	108,93	153,11
4	0,07	31,32	2,19	110,23	155,65
5	0,09	31,28	2,74	111,54	158,15
6	0,10	31,23	3,28	112,84	160,59
7	0,12	31,17	3,83	114,14	162,99
8	0,14	31,09	4,37	115,44	165,33
9	0,16	31,01	4,91	116,73	167,62
10	0,17	30,92	5,45	118,02	169,84
11	0,19	30,82	5,99	119,31	172,00
12	0,21	30,71	6,53	120,59	174,10
13	0,23	30,60	7,06	121,87	176,12
14	0,24	30,47	7,60	123,14	178,06
15	0,26	30,33	8,13	124,41	179,93
16	0,28	30,18	8,66	125,67	181,72
17	0,30	30,03	9,18	126,93	183,42
18	0,31	29,86	9,70	128,18	185,03
19	0,33	29,69	10,22	129,42	186,55
20	0,35	29,51	10,74	130,65	187,97
21	0,37	29,31	11,25	131,88	189,30
22	0,38	29,11	11,76	133,10	190,53
23	0,40	28,90	12,27	134,30	191,65
24	0,42	28,69	12,77	135,51	192,67
25	0,44	28,46	13,27	136,70	193,58
26	0,45	28,22	13,76	137,88	194,38
27	0,47	27,98	14,26	139,05	195,07
28	0,49	27,72	14,74	140,21	195,63
29	0,51	27,46	15,22	141,36	196,09
30	0,52	27,19	15,70	142,50	196,42
31	0,54	26,92	16,17	143,63	196,62
32	0,56	26,63	16,64	144,74	196,71

<b>33</b>	0,58	26,33	17,10	145,85	196,67
<b>34</b>	0,59	26,03	17,56	146,94	196,50
<b>35</b>	0,61	25,72	18,01	148,02	196,20
<b>36</b>	0,63	25,40	18,46	149,08	195,77
<b>37</b>	0,65	25,08	18,90	150,14	195,22
<b>38</b>	0,66	24,74	19,33	151,17	194,52
<b>39</b>	0,68	24,40	19,76	152,20	193,70
<b>40</b>	0,70	24,05	20,18	153,21	192,74
<b>41</b>	0,72	23,70	20,60	154,20	191,65
<b>42</b>	0,73	23,33	21,01	155,18	190,42
<b>43</b>	0,75	22,96	21,41	156,15	189,06
<b>44</b>	0,77	22,59	21,81	157,10	187,56
<b>45</b>	0,79	22,20	22,20	158,03	185,93
<b>46</b>	0,80	21,81	22,59	158,95	184,16
<b>47</b>	0,82	21,41	22,96	159,85	182,26
<b>48</b>	0,84	21,01	23,33	160,74	180,22
<b>49</b>	0,86	20,60	23,70	161,60	178,05
<b>50</b>	0,87	20,18	24,05	162,45	175,75
<b>51</b>	0,89	19,76	24,40	163,29	173,31
<b>52</b>	0,91	19,33	24,74	164,10	170,75
<b>53</b>	0,93	18,90	25,08	164,90	168,05
<b>54</b>	0,94	18,46	25,40	165,68	165,22
<b>55</b>	0,96	18,01	25,72	166,44	162,27
<b>56</b>	0,98	17,56	26,03	167,18	159,19
<b>57</b>	0,99	17,10	26,33	167,90	155,99
<b>58</b>	1,01	16,64	26,63	168,60	152,67
<b>59</b>	1,03	16,17	26,92	169,29	149,23
<b>60</b>	1,05	15,70	27,19	169,95	145,67
<b>61</b>	1,06	15,22	27,46	170,60	142,00
<b>62</b>	1,08	14,74	27,72	171,22	138,21
<b>63</b>	1,10	14,26	27,98	171,83	134,31
<b>64</b>	1,12	13,76	28,22	172,41	130,31
<b>65</b>	1,13	13,27	28,46	172,97	126,20
<b>66</b>	1,15	12,77	28,69	173,52	121,99
<b>67</b>	1,17	12,27	28,90	174,04	117,68
<b>68</b>	1,19	11,76	29,11	174,54	113,28
<b>69</b>	1,20	11,25	29,31	175,02	108,78
<b>70</b>	1,22	10,74	29,51	175,48	104,20

71	1,24	10,22	29,69	175,91	99,53
72	1,26	9,70	29,86	176,33	94,78
73	1,27	9,18	30,03	176,72	89,96
74	1,29	8,66	30,18	177,09	85,06
75	1,31	8,13	30,33	177,44	80,09
76	1,33	7,60	30,47	177,77	75,05
77	1,34	7,06	30,60	178,08	69,95
78	1,36	6,53	30,71	178,36	64,80
79	1,38	5,99	30,82	178,62	59,59
80	1,40	5,45	30,92	178,86	54,33
81	1,41	4,91	31,01	179,08	49,03
82	1,43	4,37	31,09	179,27	43,68
83	1,45	3,83	31,17	179,44	38,30
84	1,47	3,28	31,23	179,59	32,89
85	1,48	2,74	31,28	179,71	27,45
86	1,50	2,19	31,32	179,82	21,99
87	1,52	1,64	31,36	179,90	16,51
88	1,54	1,10	31,38	179,95	11,01
89	1,55	0,55	31,40	179,99	5,51
90	1,57	0,00	31,40	180,00	0,00

Mediante la risultante della  $V_0$  velocità periferica massima, è possibile calcolare le componenti vettoriali nelle due direzioni x e y,  $V_x = V_0 * \cos \theta$  e  $V_y = V_0 * \sin \theta$ , indicate in tabella, che dipendono sia dall'angolo di inclinazione che dalla velocità iniziale.

Le coordinate del punto di partenza del corpo, corrispondenti all'attacco bullonato mozzo-blade, non sono coincidenti con l'asse d'origine degli assi ma hanno coordinate 0,  $H_g$ .

Il parametro  $H_g$  è dato dalla somma dell'altezza della torre ( $H_{TORRE} = 105,00$  m) più  $Y_g$ , quest'ultimo scaturisce dal prodotto tra il raggio del rotore, o meglio, la lunghezza della blade, misurata dal punto bullonato blade-mozzo fino all'estremità della blade (75,00 m), per il seno dell'angolo di inclinazione  $\theta$ . Pertanto il valore di  $H_g$  varia al variare dell'angolo di inclinazione  $\theta$ .

Dall'analisi della gittata, si deduce che la massima distanza percorsa dall'elemento si ottiene secondo un angolo di  $32^\circ$ , e il valore massimo della gittata è pari a **196.71 m**.

## 5. Conclusioni

La distanza massima raggiunta dalla pala nell'ipotesi accidentale di cedimento dell'attacco bullonato blade-mozzo, e quindi della pala che si rompe a seguito di un evento eccezionale, è di **196.71 m**. Si precisa che nessuna civile abitazione è posizionata a una distanza minore o uguale a quella di gittata dalle turbine di progetto: pertanto risulta verificata la sicurezza nel caso di rottura degli elementi rotanti, così come richiesto al par. 1.2.1.4 del PIEAR Basilicata.

Inoltre, nessuna strada di accesso alle abitazioni, strade comunali, strade provinciale e strade statali è posizionata ad una distanza equivalente a quella di massima gittata. Per la verifica di tali distanze si rimanda, per un maggior dettaglio, all'elaborato Elab.8.

A supporto del presente studio, si allega il calcolo della gittata effettuato dalla società Vestas, società leader nella realizzazione e nella distribuzione di turbine eoliche. Lo studio è anch'esso basato sull'ipotesi del distacco di una pala nel caso del cedimento dell'attacco blade-mozzo, mentre la macchina è in funzione. Lo studio è svolto su diversi aerogeneratori realizzati dalla casa costruttrice, e dimostra come varia la gittata in funzione della velocità del rotore, dell'altezza dell'aerogeneratore, della lunghezza della pala, ma soprattutto della tipologia della stessa.

Nello studio, la società affronta due casistiche, quella reale e quella ideale. Il caso reale differisce del 20% dal caso ideale, posto a vantaggio di sicurezza. Ciò significa che, nel caso remoto di distacco dell'intera pala, la distanza della gittata nel caso reale, risulterebbe inferiore del 20%.

Per eccesso di zelo, sono stati confrontati i risultati della gittata massima del presente studio con quelli realizzati da VESTAS. Il modello messo a confronto, con quello in progetto, è l'aerogeneratore V126 della potenza di 3,3 MW, avente una lunghezza massima di 61.6 m e un'altezza massima di 180 m. Tale aerogeneratore viene preso in riferimento perché avente dimensioni superiori a quelle della V150, oggetto del presente calcolo. Dal confronto, emerge che il valore della gittata massima calcolata è pari a 196.71 m e pertanto superiore a quello riportato nello studio VESTAS, pari a 137m. Questo a dimostrazione che il calcolo effettuato considera l'ipotesi più gravosa.

In aggiunta, secondo quanto riportato nello studio di Vestas, tali valori potrebbero ridursi ulteriormente del 20% se si considerasse il caso reale.

# 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 viscosse; la seconda include le forze viscosse; 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. Cd (in-plane e out-of-plane) = 0,5
- Caso 3b. Cd (in-plane e out-of-plane) = 1,0
- Caso 3c. Cd (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.

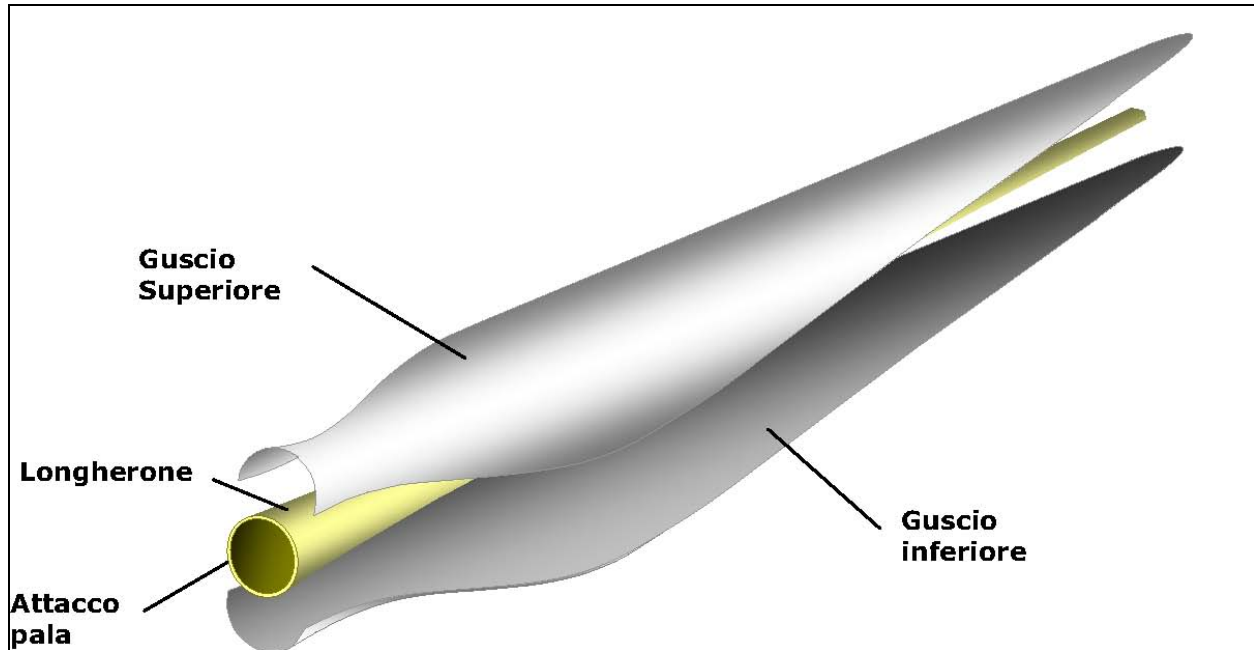
Tralasciando gli incidenti dovuti a cause eccezionali (uragani, tifoni), nei successivi paragrafi sono descritti alcuni eventi e la valutazione tecnica alla base dell'analisi dei rischi sviluppata per eliminare la possibilità di reiterazione dell'incidente.

### 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.

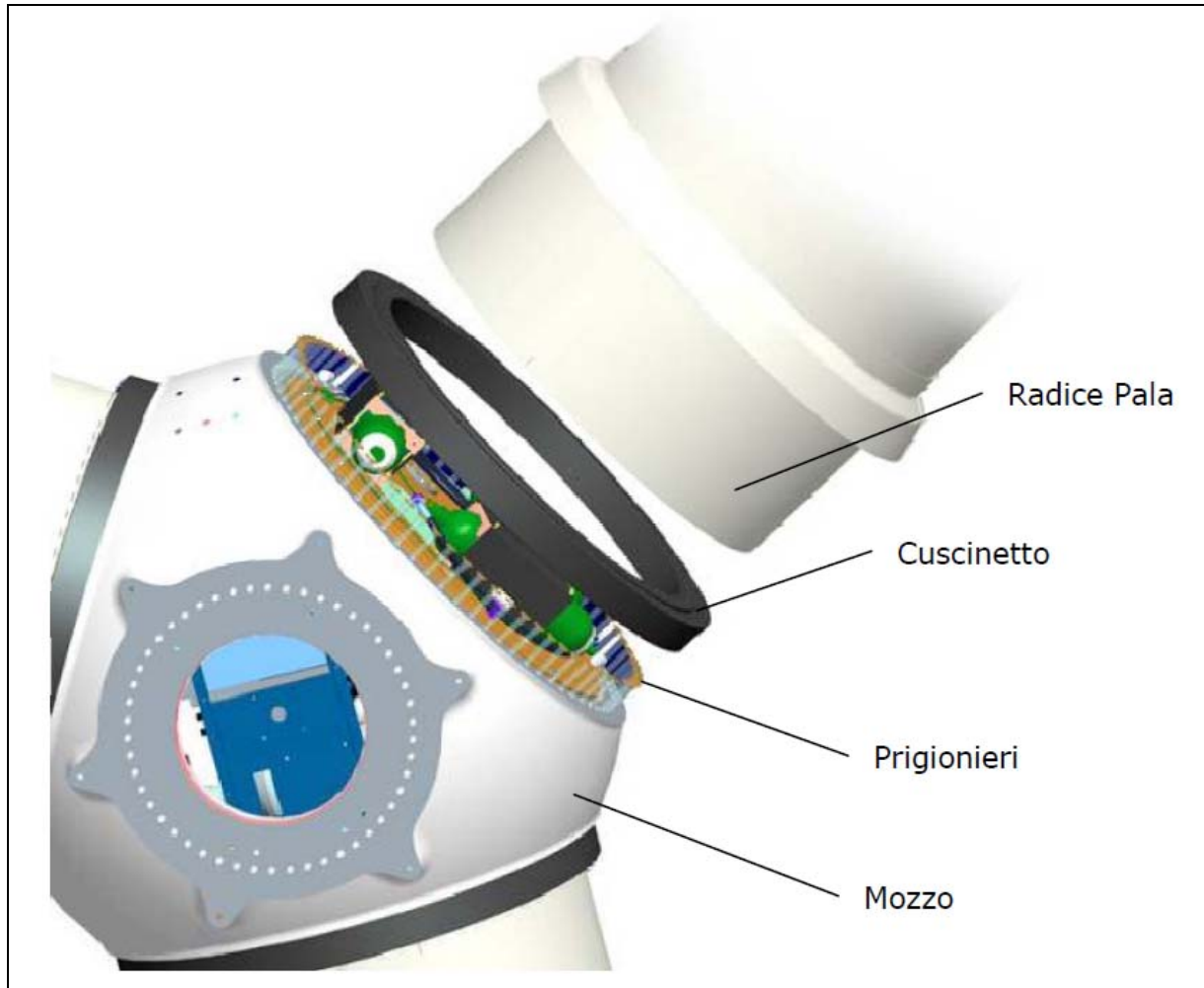
Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posta all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente la funzione di forma del profilo. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono unite fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo,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





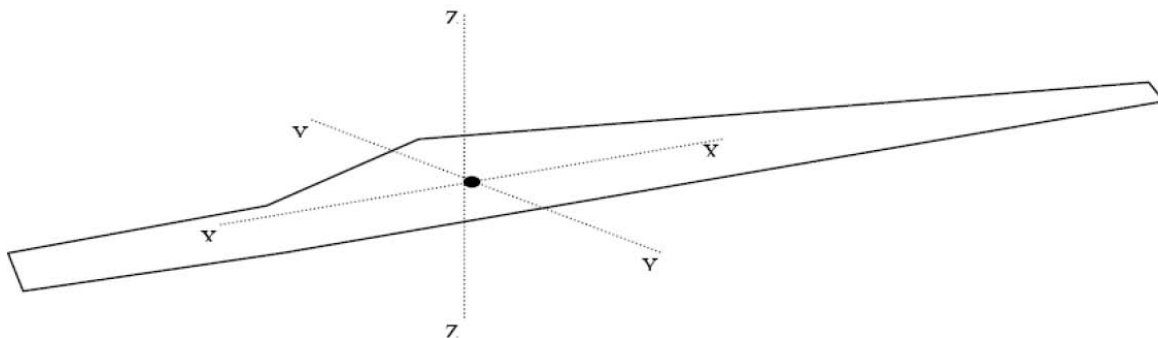
**Figura 3: Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica.**

## 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.