



REGIONE BASILICATA



**PARCO EOLICO SERRA GAGLIARDI  
GENZANO DI LUCANIA (PZ)**

# ELABORATO DI PROGETTO



2	08/03/2016	Ing. M.Martellucci	Ing. M.Martellucci	Ing. F. Di Chiappari	
1	30/07/2014	Ing. M.Martellucci	Ing. M.Martellucci	Ing. F. Di Chiappari	
0	10/01/2011	Ing. M.Martellucci	Ing. M.Martellucci	Ing. F. Di Chiappari	
Em./Rev.	Data	Red./Dis.	Verificato	Approvato	Descrizione

Redazione: **SKYWIND S.r.l.** via Marconi, 6, 04024 Gaeta (LT)

Titolo dell'allegato:

**ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA  
ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI**



Pagine:

*1 di 36*

Doc.n°:

**A.7.**

Committente:



**SKYWIND**  S.r.l. Via Marconi, 6  
04024 Gaeta (LT) ITALY

## Sommario

GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI .....	3
1. Primo caso: traiettoria a giavellotto con minore resistenza aerodinamica;.....	3
2. Secondo caso: traiettoria a giavellotto con maggiore resistenza aerodinamica;.....	3
3. Terzo caso: Calcolo della gittata massima in presenza di moti di rotazione intorno a ciascuno dei tre assi principali del frammento stesso; .....	3
1. Caso 1: Moto irrotazionale .....	6
2. Caso 2: Moto irrotazionale .....	6
<i>Caso 2a. L'effetto della portanza sul tempo di volo è zero; .....</i>	<i>7</i>
<i>Caso 2b. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%. .....</i>	<i>7</i>
<i>Caso 2c. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%, in questo caso si ottiene il maggior tempo di volo.....</i>	<i>7</i>
3. Caso 3: Moto rotazionale complesso .....	7
Caso 1 .....	9
TIPO 1 .....	9
TIPO 2 .....	9
Caso 2b.....	9
TIPO 1 .....	9
TIPO 2 .....	9
Caso 2c.....	10
TIPO 1 .....	10
TIPO 2 .....	10
Caso 3a.....	10
TIPO 1 .....	10
TIPO 2 .....	10
Caso 3b.....	11
TIPO 1 .....	11
TIPO 2 .....	11
Caso 3c .....	11
TIPO 1 .....	11
TIPO 2 .....	11
Equazioni del moto.....	14
CERTIFICAZIONE DEGLI AEROGENERATORI ALLE CONDIZIONI ESTREME .....	18
RIFERIMENTO DOCUMENTO TECNICO COSTRUTTORE del 07/03/2014 .....	20

## **GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI**

La tecnologia costruttiva degli aerogeneratori è molto sofisticata e di chiara derivazione aeronautica, quindi, la valutazione della gittata massima degli elementi di un aerogeneratore, in caso di rottura accidentale, deve necessariamente essere effettuato direttamente dalla casa produttrice, in quanto presuppone conoscenze specifiche spesso coperte anche da brevetti.

I modelli teorici che meglio possono caratterizzare il moto nello spazio dei frammenti di pala o dell'intera pala possono essere ricondotti ai casi seguenti:

**1. Primo caso:** *traiettoria a giavellotto con minore resistenza aerodinamica;*

Calcolo della gittata massima del generico frammento di ala, in assenza di moto rotazionale intorno ad un asse qualsiasi, con traiettoria e dimensione media del frammento complanari al rotore.

**2. Secondo caso:** *traiettoria a giavellotto con maggiore resistenza aerodinamica;*

Calcolo della gittata massima del generico frammento di ala, sempre in assenza di moto rotazionale intorno ad un asse qualsiasi, con traiettoria complanare al rotore e dimensione media del frammento ortogonale al piano del rotore.

**3. Terzo caso:** *Calcolo della gittata massima in presenza di moti di rotazione intorno a ciascuno dei tre assi principali del frammento stesso;*

In caso di rottura, infatti, per il principio di conservazione del momento angolare, il generico spezzone di pala tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano; inoltre, a causa delle diverse pressioni cinetiche

esercitate dal vento, lo spezzone di pala tende anche a ruotare intorno a ciascuno dei due assi principali appartenenti al proprio piano.

Come si è già specificato precedentemente i calcoli da effettuare per determinare il valore della gittata massima sono molto complessi e di chiara competenza delle ditte fornitrici. L'impossibilità da parte del proponente di poter definire, in questa fase progettuale quale sarà l'azienda fornitrice degli aerogeneratori, ci porta a considerare casi del tutto generici e a citare studi eseguiti da varie ditte produttrici di turbine eoliche nei quali si analizza la gittata di tre tipi di spezzoni di pala in caso di rottura accidentale, seguendo le 3 ipotesi di moto precedentemente descritte.

In particolare si cita lo studio seguente che ha preso in considerazione due aerogeneratori, aventi caratteristiche diverse:

- il primo aerogeneratore ha una pala di lunghezza pari a 39 m e una velocità di rotazione massima a regime di 19,2 rpm posto su una torre di altezza pari a 67 m;
- il secondo aerogeneratore ha una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 rpm posto su una torre di altezza pari a 80 m.

Per il primo TIPO di aerogeneratore è stato fatto uno studio completo ipotizzando tre condizioni:

- la prima più conservativa include solo le forze di inerzia ed esclude le forze viscosi;
- la seconda include le forze viscosi;
- la terza considera il moto della pala completo.

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 complesso in quanto dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e anche dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala).

La velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della pala per l'aerogeneratore TIPO 1 è pari a 20 rpm, anche se in realtà il range di velocità del rotore è tra 16,7 e 19,0 m/s; per l'aerogeneratore TIPO 2, la velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della pala è pari a 16,39 rpm (range reale di velocità pari a  $8,8 \div 14,9$  m/s). La velocità di distacco della pala dal rotore è stata aumentata del 5% per l'aerogeneratore TIPO 1 da 19 a 20 rpm, mentre per l'aerogeneratore TIPO 2 è stata aumentata del 10% passando così da 14,9 a 16,39 rpm.

Per quanto riguarda le forze agenti sulla traiettoria della pala, le ipotesi fatte nello studio considerato prendono in esame il caso peggiore, esso avviene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di  $45^\circ$  sul piano verticale (cioè  $135^\circ$  azimuth). La determinazione delle forze e dei momenti agenti sulla pala a causa di una rottura istantanea, durante il moto rotatorio, è molto complessa. La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate inerziali agenti sulla pala. Questo include anche, per esempio, oltre all'impulso anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise agenti al momento del distacco. Quindi, la pala 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, infine la gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco iniziale e le forze inerziali sono modellate considerando un flusso irrotazionale e stazionario.

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

	(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)
<b>TIPO 1</b>	44	87.84	25.69	2.37	6200
<b>TIPO 2</b>	39	81.46	22.80	2.38	6300

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

### **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.

### **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.

A seconda degli effetti della portanza si individuano tre sottocasi:

**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.

### **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 causato 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 XX e YY. Per semplificare lo studio si è assunta l'area della pala pari all'area della pala 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 analizzati 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

**Caso 3c**:  $C_d$  (in plane e out-of-plane)=1.5

Come si evince dai risultati riportati di seguito, 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 il secondo TIPO, 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 sono da considerare il 20% maggiori di quelle reali.

<i>Caso 1</i>	<i>TIPO 1</i>	<i>TIPO 2</i>
	For Drag IPA=2.38m <sup>2</sup> IPCD=OPCD=2 OPA=81.46m <sup>2</sup>	For Drag IPA=2.37m <sup>2</sup> IPCD=OPCD=2 OPA=87.84m <sup>2</sup>
<b>Velocità di rotazione (rpm)</b>	20.0	27.5
<b>Tempo di volo</b>	6.27	5.44
<b>Distanza in-plane (m)</b>	104.4	86.37
<b>Distanza out-of-plane (m)</b>	80.1	64.73
<b>Distanza vettoriale (m)</b>	131.6	108.0

<i>Caso 2b</i>	<i>TIPO 1</i>	<i>TIPO 2</i>
	For Drag IPA=2.38m <sup>2</sup> IPCD=2 OPCD=0.15 OPA=81.46m <sup>2</sup>	
<b>Velocità di rotazione (rpm)</b>	20.0	
<b>Tempo di volo</b>	6.49	
<b>Distanza in-plane (m)</b>	107.6	
<b>Distanza out-of-plane (m)</b>	14.2	
<b>Distanza vettoriale (m)</b>	108.6	

<i>Caso 2c</i>	<i>TIPO 1</i>	<i>TIPO 2</i>
	For Drag IPA=2.38m <sup>2</sup> IPCD=2 OPCD=0.15 OPA=81.46m <sup>2</sup>	
<b>Velocità di rotazione (rpm)</b>	20.0	
<b>Tempo di volo</b>	6.74	
<b>Distanza in-plane (m)</b>	112.5	
<b>Distanza out-of-plane (m)</b>	15.5	
<b>Distanza vettoriale (m)</b>	113.5	

<i>Caso 3a</i>	<i>TIPO 1</i>	<i>TIPO 2</i>
	For Drag IPA=40.73 m <sup>2</sup> IPCD=0.5 OPCD=0.5 OPA=40.73m <sup>2</sup>	
<b>Velocità di rotazione (rpm)</b>	20.0	
<b>Tempo di volo</b>	6.74	
<b>Distanza in-plane (m)</b>	103.8	
<b>Distanza out-of-plane (m)</b>	24	
<b>Distanza vettoriale (m)</b>	106.5	

<i>Caso 3b</i>	<i>TIPO 1</i>	<i>TIPO 2</i>
	For Drag IPA=40.73 m <sup>2</sup> IPCD=1 OPCD=1 OPA=40.73m <sup>2</sup>	
<b>Velocità di rotazione (rpm)</b>	20.0	
<b>Tempo di volo</b>	6.74	
<b>Distanza in-plane (m)</b>	94.6	
<b>Distanza out-of-plane (m)</b>	41	
<b>Distanza vettoriale (m)</b>	103.1	

<i>Caso 3c</i>	<i>TIPO 1</i>	<i>TIPO 2</i>
	For Drag IPA=40.73 m <sup>2</sup> IPCD=1.5 OPCD=1.5 OPA=40.73m <sup>2</sup>	
<b>Velocità di rotazione (rpm)</b>	20.0	
<b>Tempo di volo</b>	6.74	
<b>Distanza in-plane (m)</b>	87.3	
<b>Distanza out-of-plane (m)</b>	53.7	
<b>Distanza vettoriale (m)</b>	102.5	

I risultati dell'analisi indicano che con lo studio più complesso (caso 3), la gittata della pala, per l'aerogeneratore TIPO 1, è inferiore a 110 m; mentre nel caso peggiore ma non reale (caso 1), la gittata della pala è di poco superiore a 130, mentre per il TIPO 2 è pari a circa 108 m (unico caso studiato quello conservativo ma non reale per cui il risultato è maggiore del 20% rispetto al reale).

Concludendo, secondo lo studio considerato:

- 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 (TIPO 1) sarà di ca. 130 m, mentre per la pala da 44 m (TIPO 2) sarà di ca. 108 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. 106 m.

Il caso reale da considerare è il caso 3 per cui si può concludere che la gittata di una pala del TIPO 1 (39 m di lunghezza) è di ca. 106 m, mentre per la pala del TIPO 2 (44 m di lunghezza) sarà di ca. 87 m (20% in meno della gittata nel caso ideale, caso 1)

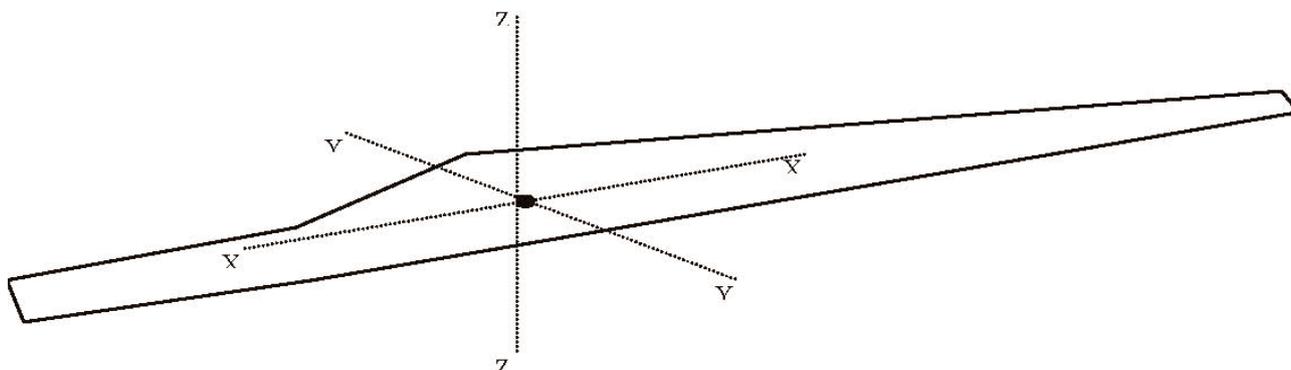
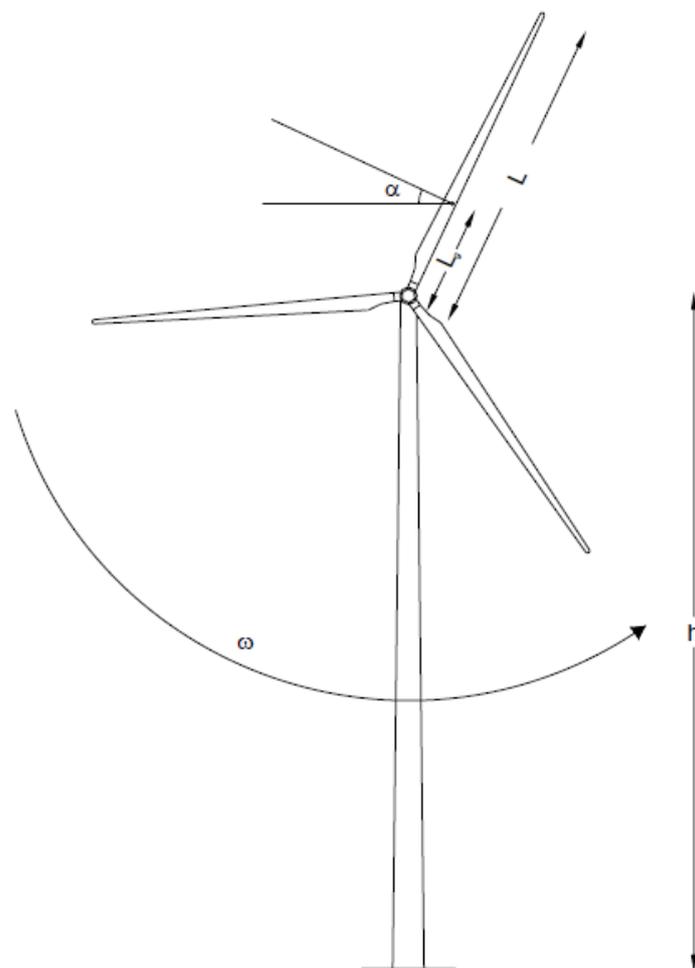


Fig 1 – Sistema di coordinate usato per la pala YY (Flapwise); XX (Pitchwise); ZZ (Edgewise)

Per verificare, ulteriormente, i risultati dello studio citato si è scelto di andare a calcolare il valore della gittata massima facendo ipotesi più semplici.

Il problema si risolve andando a valutare la distanza massima che raggiunge un corpo (in questo caso la pala) quando viene lanciato da un'altezza  $h$  (l'altezza del mozzo pari a 100 m), con velocità  $v$  e con una direzione che forma un angolo  $\alpha$  con il terreno.

La soluzione sarà la massima gittata del baricentro del corpo (pala) in caso di rottura accidentale, durante il funzionamento dell'aerogeneratore a potenza e velocità nominale.



## ***Equazioni del moto***

Il moto considerato è di tipo rotazionale, cioè quello fisicamente più probabile. Non viene considerata la possibilità, puramente teorica, che il corpo assuma una traiettoria "a giavellotto".

Inoltre, ponendosi nelle condizioni peggiori possibili, viene trascurata la presenza dell'aria che nella realtà genera forze di resistenza al moto che ne ridurrebbero tempo di volo e distanza di caduta.

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{z} = -g \text{ nella direzione verticale} \\ \ddot{x} = 0 \text{ nella direzione orizzontale} \end{array} \right. \quad \text{allora} \quad \left\{ \begin{array}{l} z = h + vt \sin \alpha - \frac{1}{2} gt^2 \\ x = vt \cos \alpha \end{array} \right.$$

Il corpo tocca terra per  $z=0$  per cui risulta

$$h + vt \sin \alpha - \frac{1}{2} gt^2 = 0$$

La soluzione dell'equazione di secondo grado per tempi positivi è

$$t = \frac{1}{g} \left( v \sin \alpha + \sqrt{v^2 \sin^2 \alpha + 2gh} \right)$$

Pertanto, quando il corpo raggiunge terra è

$$x = \frac{v}{g} \cos \alpha \left( v \sin \alpha + \sqrt{v^2 \sin^2 \alpha + 2gh} \right);$$

Ovvero

$$\frac{x}{h} = \frac{v^2}{2gh} 2 \cos \alpha \sin \alpha \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2gh}{v^2 \sin^2 \alpha}} \right)$$

Il valore massimo di  $x$  (massima gittata del baricentro del corpo) dipende dall'angolo di lancio  $\alpha$ , bisognerà quindi trovare il massimo della funzione

$$x_G(\alpha) = \frac{\omega^2 L^2 \sin 2\alpha}{2g} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{2g(H + L \cos \alpha)}{\omega^2 L^2 \sin^2 \alpha}} \right] + L \sin \alpha$$

Se si prevede l'utilizzo di un aerogeneratore avente le caratteristiche riportate nella tabella successiva, in cui sono evidenziate le caratteristiche geometriche (rif. All. Caratteristiche tecniche) e la soluzione cercata.

Dati del Problema		
Altezza mozzo	H	100 m
Lunghezza pala	L	42.75 m
Distanza baricentro G dal mozzo	L <sub>G</sub>	12.5 m
Frequenza massima	f	16 giri/min
Velocità angolare	$\varpi = 2\pi f$	1.68 rad/s
Velocità tangenziale	$V = \varpi L_G$	23.73 m/s

Soluzione		
Angolo di gittata	$\alpha$	27.3°
Massima distanza di gittata baricentro	D <sub>Gmax</sub>	133.58 m

Pertanto, nell'ipotesi che la pala, a seguito di rottura accidentale, continui a spostarsi lungo l'asse ortogonale al proprio piano e che arrivi a toccare il suolo con la sua estremità non nel verso del moto, la massima distanza raggiungibile è pari a 133.58 m.

Il valore ottenuto è sicuramente compatibile con quelli ottenuti negli studi forniti dalle ditte produttrici, si tenga conto infatti che la turbina da noi considerata ha caratteristiche geometriche diverse dalle precedenti.

Si rappresenta, inoltre, che la frequenza di rotazione in base alla quale si calcola la velocità di rotazione delle pale e quindi determina il valore della gittata massima dei frammenti in caso di rottura in genere varia con il modello di aerogeneratore da installare nel campo eolico di progetto, come si può evincere dalla seguente tabella, in cui sono elencati 5 diversi aerogeneratori di grossa potenza:

TURBINA Ditta/Modello	POTENZA (MW)	FREQUENZA	
		Giri/minuto (Minimi)	Giri/minuto (Massimi)
VESTAS V112	3.6	6.2	17.7
VESTAS V90	3.0	8.6	18.4
GENERAL ELECTRIC GE 3.0	2.5 ÷ 3.0	8.80	14.90
WIN WIND D-3	3.0	7.20	15.30
NORDEX N90	2.50	9.60	14.85

Usare nei calcoli frequenze di rotazione maggiori a quelle di regime per valori di velocità del vento inferiori a 25 m/s, come ad esempio  $f = 20$  giri/min, porta alla sovrastima delle traiettorie, ma può tener conto di eventuali transitori dovuti allo slittamento del generatore ed agli effetti del sistema di pendenza.

Si sottolinea che i valori precedentemente calcolati vanno considerati solo in prima approssimazione. Infatti, teoricamente e non tenendo conto delle caratteristiche aerodinamiche della pala, se il distacco di un frammento avviene quando la pala è a 45 gradi dalla verticale percorrerà la traiettoria più lunga.

La presenza dell'aria, però, genera comunque delle forze di resistenza viscoso che agendo sulla superficie del frammento ne riducono tempo di volo e distanza.

A questa azione vanno aggiunte le forze aerodinamiche di portanza che possono innescarsi sul frammento di pala in virtù del profilo aerodinamico secondo il quale vengono modellate le sezioni trasversali della pala stessa, tale portanza potrebbe addirittura prolungare il volo e allungare la distanza percorsa. Tale possibilità è correlata, tra l'altro, al rollio, all'imbardata ed all'impennarsi della pala durante il volo. L'azione della portanza può essere ricondotta e schematizzata nei calcoli con una riduzione % della forza peso.

Per le conclusioni finali, si rimanda alle relazioni specialistiche rilasciate dal produttore degli aerogeneratori.

## **CERTIFICAZIONE DEGLI AEROGENERATORI ALLE CONDIZIONI ESTREME**

In linea generale bisogna premettere che le verifiche di resistenza dell'aerogeneratore nel suo insieme, pale, rotore, torre e fondazione, verranno esaurientemente trattate in fase di deposito dei Calcoli Statici, laddove insieme ai problemi di resistenza statica all'evento estremo, saranno anche analizzate le sollecitazioni dinamiche.

Si rappresenta infatti che durante la rotazione gli elementi strutturali sono sollecitati ciclicamente richiedendo quindi verifiche di resistenza a fatica e misure atte a scongiurare eventuali gravi pericoli di fenomeni di risonanza.

La Normativa Italiana, con il D.M. del 16/1/96, "Norme tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi", e s.m.i., per il calcolo della pressione cinetica del vento  $q_{ref}$  fa riferimento ad un periodo di ritorno  $T=50$  anni.

Eventi estremi come quello consigliato dal Regolamento Regionale n.9, in narrativa, sono invece previsti dai costruttori degli aerogeneratori per progettare e verificare gli elementi strutturali nelle condizioni di esercizio più proibitive per installazioni in ogni parte del mondo.

Basta pensare ai siti realizzati nei Paesi del Nord, ai siti off-shore sul mar del Nord ed alle installazioni nei Paesi Tropicali, tutti luoghi dove le sollecitazioni del vento sono ben più grandi che sul nostro territorio nazionale e nel bacino del Mediterraneo in genere.

Per convenzione internazionale l'Organismo IEC ha classificato tutti i luoghi della terra in 4 classi in funzione del regime anemometrico della zona, tale suddivisione viene riportata nella tabella seguente:

**Table 1 – Basic parameters for WTGS classes**

WTGS class		I	II	III	IV	S
$V_{ref}$	(m/s)	50	42,5	37,5	30	Values to be specified by the designer
$V_{ave}$	(m/s)	10	8,5	7,5	6	
A	$I_{15}$ (-)	0,18	0,18	0,18	0,18	
	a (-)	2	2	2	2	
B	$I_{15}$ (-)	0,16	0,16	0,16	0,16	
	a (-)	3	3	3	3	

where

the values apply at hub-height, and

A designates the category for higher turbulence characteristics,

B designates the category for lower turbulence characteristics,

$I_{15}$  is the characteristic value of the turbulence intensity at 15 m/s,

a is the slope parameter to be used in equation (7).

**Il territorio in cui viene installato un campo Eolico appartiene ad una delle 4 classi, il produttore fornisce, di conseguenza, aerogeneratori certificati per tale classe di appartenenza e, quindi, tutti gli elementi strutturali sono verificati alle relative sollecitazioni.**

Eventuali ulteriori documentazioni e certificazioni relative al comportamento statico dell'aerogeneratore sotto l'azione di un evento estremo relativo ad un periodo di ritorno  $T=100$  anni per la durata di 1 secondo, di chiara competenza della ditta costruttrice, qualora ritenute necessarie, verranno prodotte in sede di deposito dei Calcoli Strutturali, in fase esecutrice.

**RIFERIMENTO DOCUMENTO TECNICO COSTRUTTORE**

**VESTAS**

**CALCOLO DELLA TRAIETTORIA DI UNA  
PALA EOLICA IN CONDIZIONI NOMINALI  
DI FUNZIONAMENTO**

Del 07/03/2014 rev. 13

# 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;
- 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, 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 causato 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.

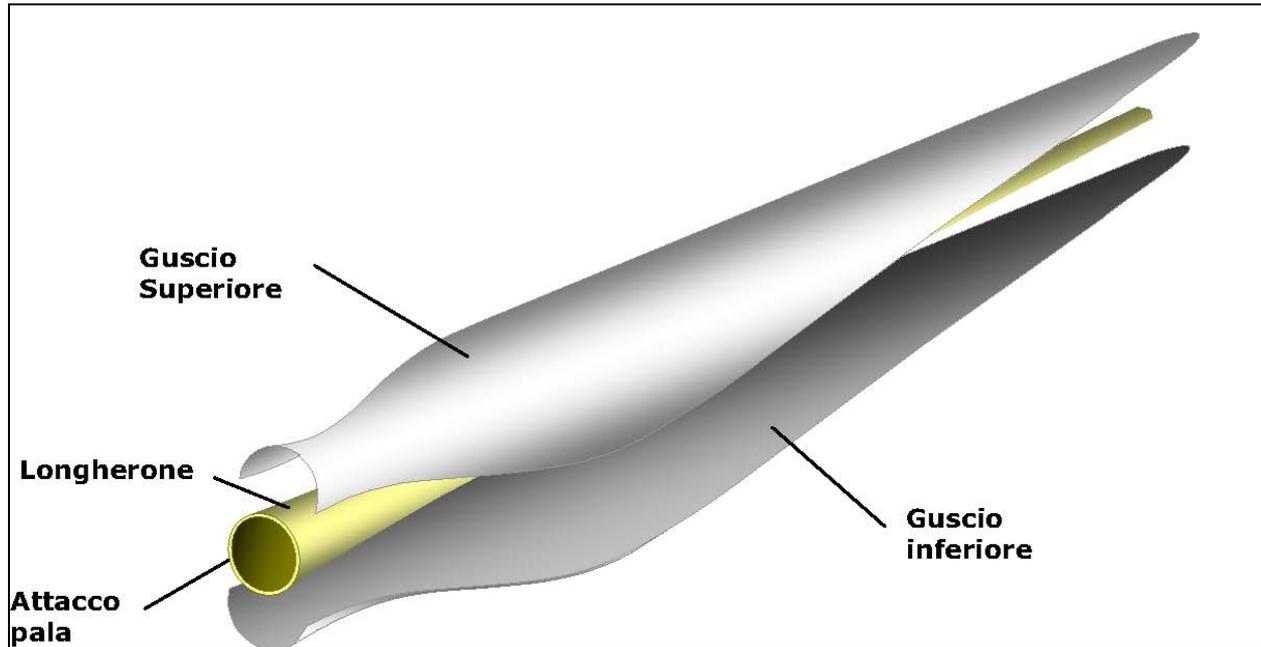
Tralasciando gli incidenti dovuti a cause eccezionali (uragani, tifoni), nei successivi paragrafi sono descritti alcuni eventi e la valutazione tecnica alla base dell'analisi dei rischi sviluppata per eliminare la possibilità di reiterazione dell'incidente.

### 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.

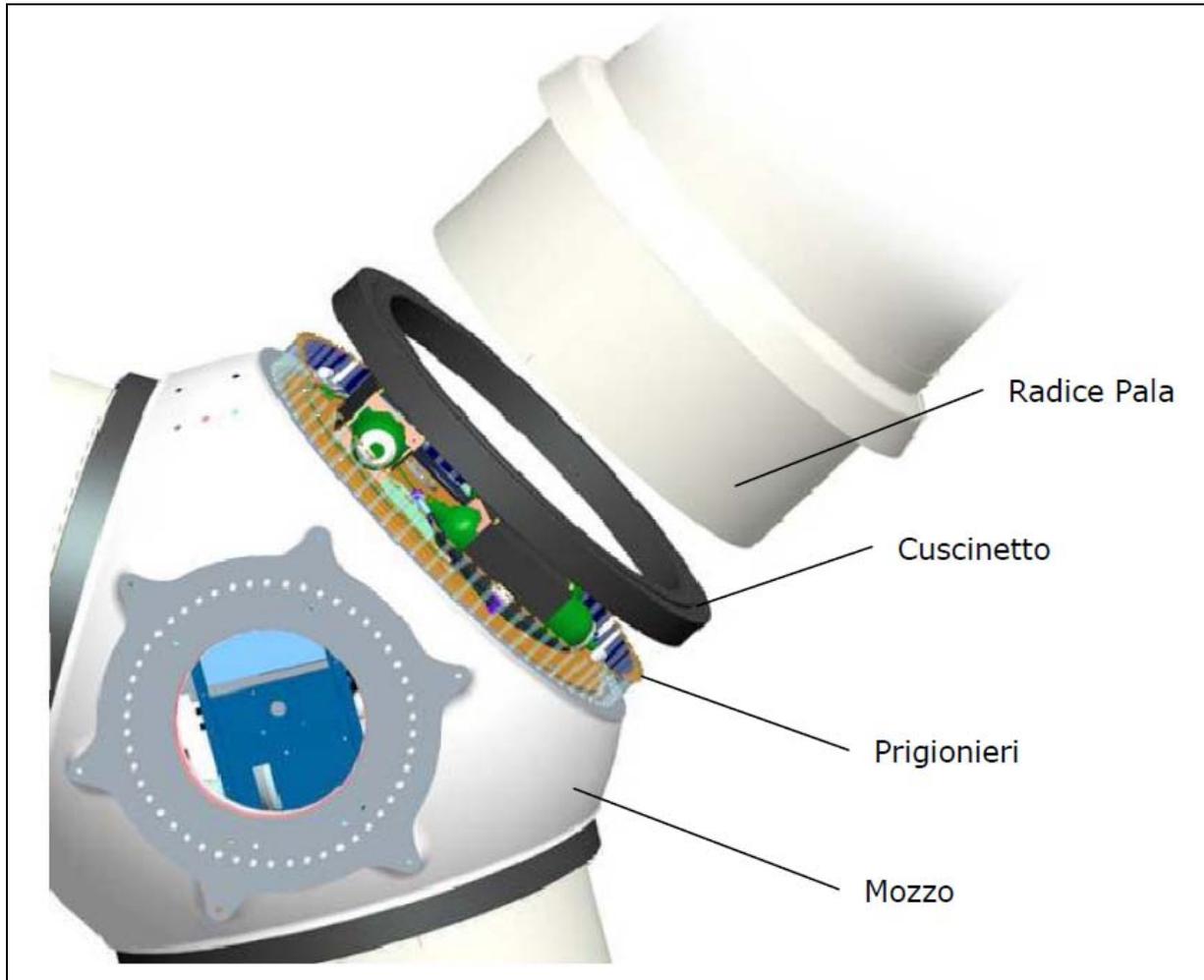
Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posta all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente la funzione di forma del profilo. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono unite fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo,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



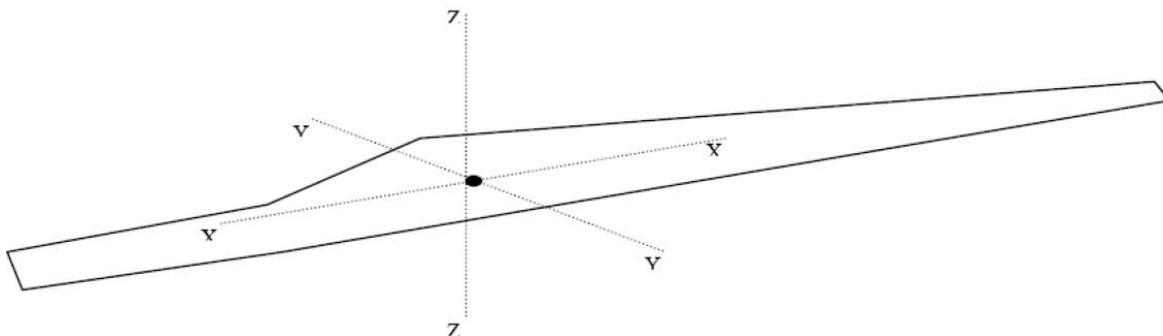
**Figura 3: Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica.**

## 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, 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, 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 esposte 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	Pala V112 3,0/3,3MW HH94	Pala V112 3,0/3,3MW HH119
Velocità di rotazione	20	17	18,4	16,6	14,9	13,4	14,9	17,7	17,7
Tempo di volo	7,6	7	7.5	7	6,5	7	6,5	7	8
Distanza Vettoriale	99,6	75	85	80	70	60	75	95	110

Caso 3	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	16,5	16,5
Tempo di volo	7,5	7,5	7,6	8,0
Distanza Vettoriale	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.