



REGIONE BASILICATA



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

ELABORATO DI PROGETTO

2					
1					
0	10/01/2011	Ing. M.Martellucci	Ing. M.Martellucci	Ing. F. Di Chiara	
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 28

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 VESTAS	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° (135° 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° sul piano verticale (cioè 135° 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 ²)	plan area Plane XZ (m ²)	plan area Plane YZ (m ²)	mass (kg)
TIPO 1	44	87.84	25.69	2.37	6200
TIPO 2	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° . 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 ² IPCD=OPCD=2 OPA=81.46m ²	For Drag IPA=2.37m ² IPCD=OPCD=2 OPA=87.84m ²
Velocità di rotazione (rpm)	20.0	27.5
Tempo di volo	6.27	5.44
Distanza in-plane (m)	104.4	86.37
Distanza out-of-plane (m)	80.1	64.73
Distanza vettoriale (m)	131.6	108.0

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

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

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

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

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

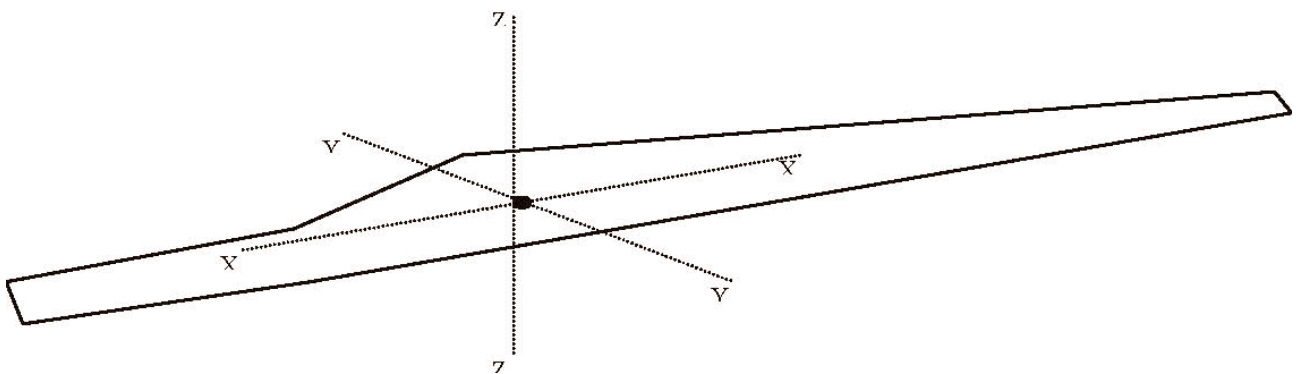
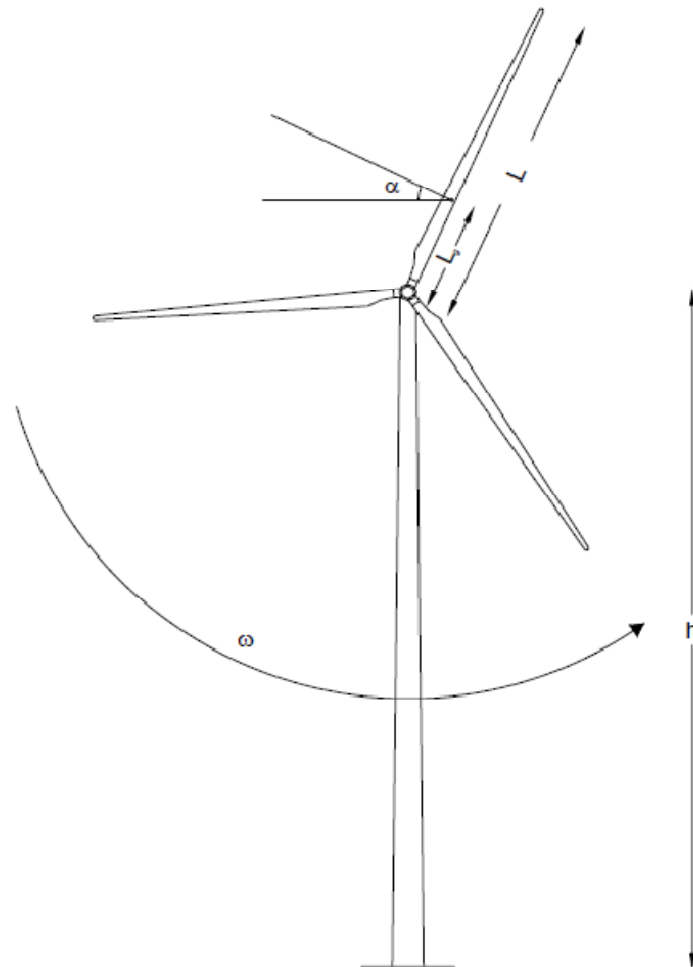


Fig 1 – Sistema di coordinate usato per la pala YY (Flapwise); XX (Pitchwise); ZZ (Edgewise)

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 α 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 α , 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 _G	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	α	27.3°
Massima distanza di gittata baricentro	D_{Gmax}	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 167.57 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	3.0	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.

Si può concludere che, avendo posizionato tutti gli aerogeneratori a distanza superiore ai 300 m dalle abitazioni ed a distanza superiore ai 200 m dalle strade, in caso di rottura accidentale non vi sono condizioni di pericolo per cose o persone.

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 VESTAS

VESTAS

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

GENNAIO 2007

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 effettuato su due aerogeneratori VESTAS V80 e V90 3MW.

Il primo aerogeneratore, V80, 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, V90 3MW, ha 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 80 m.

Per la pala della V80 si è fatto uno studio completo ipotizzando tre condizioni: la prima più conservativa include solo le forze di inerzia ed esclude le forze viscosse; la seconda include le forze viscosse; la terza considera il moto della pala completo. Come si evince dai risultati riportati

in appendice, 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 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 sono da considerare il 20% maggiori di quelle reali.

Risultati

I risultati ottenuti sono riportati in appendice.

I risultati dell'analisi indicano che con lo studio più complesso (caso 3), la gittata della pala, per la V80, è inferiore a 110 m; mentre nel caso peggiore ma non reale (caso 1), la gittata della pala, per la V80, è di poco superiore a 130, mentre per la V90 3MW è di ca. pari a 140 m (unico caso studiato quello conservativo ma non reale per cui il risultato è maggiore del 20% rispetto al reale).

Metodologia e assunzioni

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° (135° 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 ed anche dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala).

Velocità di rotazione

La velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della pala per la V80 è pari a 20 rpm. In realtà il range di velocità del rotore è tra 16,7 e 19,0 m/s.

La velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della pala per la V90 3MW è pari a 20,14 rpm. In realtà il range di velocità del rotore è tra 8,6 e 18,4 m/s.

La velocità di distacco della pala dal rotore è stata aumentata del 5% per la V80 da 19 a 20 rpm, mentre per la V90 3MW è stata aumentata del 10% passando così da 18,4 a 20,14 rpm).

Forze agenti sulla traiettoria della 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° sul piano verticale (cioè 135° 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.

La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco iniziale.

Le forze inerziali sono modellate considerando un flusso irrotazionale e stazionario.

Caratteristiche della pala

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

	(Outboard) Section of blade	plan area Plane XY m ²	plan area Plane XZ m ²	plan area Plane YZ m ²	mass kg
V90	44	87,84	25,69	2,37	6200,0
V80	39	81,46	22,80	2,38	6300,0

Casi Considerati

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.

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.

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°.

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.

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) sarà di ca. 130 m, mentre per la pala da 44 m (V90 3MW) sarà di ca. 140 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 V80 (39 m di lunghezza) è di ca. 106 m, mentre per la pala V90 3MW (44 m di lunghezza) sarà di ca. 112 m (20% in meno della gittata nel caso ideale, caso 1)

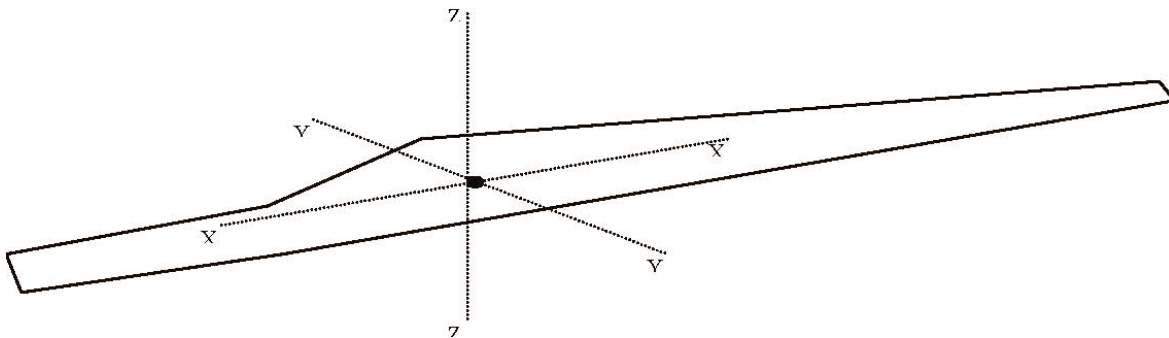


FIGURE 1 – SISTEMA DI COORDINATE USATO PER LA PALA
(YY – Flapwise, XX – Pitchwise, ZZ – Edgewise)

RIFERIMENTI

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

APPENDICE 1

Caso 1	Pala V80	Pala V90 3MW
	For Drag IPA= 2.38 m ² IPCD=OPCD=2 OPA=81.46m ²	For Drag IPA= 2.37 m ² IPCD=OPCD=2 OPA=87.84m ²
Velocità di rotazione (rpm)	20.0	27.5
Tempo di volo	6.27	5.44
Distanza in-plane (m)	104.4	111.70
Distanza out-of-plane (m)	80.1	85.84
Distanza vettoriale (m)	131.6	140.88

Caso 2b	Pala V80	Pala V90 3MW
	For Drag IPA= 2.38 m ² IPCD=2 OPCD=0.15 OPA=81.46 m ²	
Velocità di rotazione (rpm)	20,0	
Tempo di volo	6.49	N.A.
Distanza in-plane (m)	107.6	N.A.
Distanza out-of-plane (m)	14.2	N.A.
Distanza vettoriale (m)	108.6	N.A.

Caso 2c	Pala V80	Pala V90 3MW
	For Drag IPA= 2.38 m ² IPCD=2 OPCD=0.15 OPA=81.46 m ²	
Velocità di rotazione (rpm)	20,0	
Tempo di volo	6.74	N.A.
Distanza in-plane (m)	112.5	N.A.
Distanza out-of-plane (m)	15.5	N.A.
Distanza vettoriale (m)	113.5	N.A.

Caso 3a	Pala V80	Pala V90 3MW
	For Drag IPA= 40.73 m ² IPCD=0.5 OPCD=0.5 OPA=40.73 m ²	
Velocità di rotazione (rpm)	20,0	
Tempo di volo	6.74	N.A.
Distanza in-plane (m)	103.8	N.A.
Distanza out-of-plane (m)	24.0	N.A.
Distanza vettoriale (m)	106.5	N.A.

Caso 3b	Pala V80	Pala V90 3MW
	For Drag IPA= 40.73 m ² IPCD=1 OPCD=1 OPA=40.73 m ²	
Velocità di rotazione (rpm)	20,0	
Tempo di volo	6.74	N.A.
Distanza in-plane (m)	94.6	N.A.
Distanza out-of-plane (m)	41.0	N.A.
Distanza vettoriale (m)	103.1	N.A.

Caso 3c	Pala V80	Pala V90 3MW
	For Drag IPA= 40.73 m ² IPCD=1.5 OPCD=1.5 OPA=40.73 m ²	
Velocità di rotazione (rpm)	20,0	
Tempo di volo	6.74	N.A.
Distanza in-plane (m)	87.3	N.A.
Distanza out-of-plane (m)	53.7	N.A.
Distanza vettoriale (m)	102.5	N.A.