

REGIONE
BASILICATA



COMUNE DI VENOSA (PZ)



Provincia
Potenza



COMUNE DI MONTEMILONE (PZ)



**PROGETTO DEFINITIVO RELATIVO ALLA REALIZZAZIONE DI UN
IMPIANTO EOLICO COSTITUITO DA 7 AEROGENERATORI E
DALLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA R.T.N.
IMPIANTO "Bruno"- Potenza 42,7 MW Comuni di Montemilone- Venosa (PZ)**

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

ELABORATO

A.7

PROPONENTE:



MILLEK S.R.L.

Sede Legale Via Tadino, 52

20124 Milano (MI)

P.IVA 09702620965

MAIL: info@millek.it

PEC: postmaster@pec.millek.it

MIDLEK SRL
Via Tadino 52
20124 MILANO
P.Iva 09702620965

PROGETTO E SIA:



Via della Resistenza, 46 - 70125 Bari - tel. 080 3215948 fax. 080 2020986

Il DIRETTORE TECNICO
Dott. Ing. Orazio Tricarico



CONSULENZA:

EM./REV.	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
1	SETT 2021	A.A. - O.T.	A.A. - O.T.	A.A. - O.T.	
0	DIC 2020	A.A. - O.T.	A.A. - O.T.	A.A. - O.T.	Progetto definitivo

1.PREMESSA.....	2
2.IPOTESI DI CALCOLO	3
3.CALCOLO DEI DATI FONDAMENTALI.....	4
3.1. CALCOLO DEL BARICENTRO RG	5
3.2. CALCOLO DELLA VELOCITÀ PERIFERICA DEL BARICENTRO VG	5
3.3. CALCOLO DI HG	5
4.CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA.....	6
5.CONSIDERAZIONI.....	10



1. PREMESSA

In riferimento al progetto per la realizzazione di un **impianto eolico costituito da 7 turbine e relative opere di connessione alla RTN, aventi potenza complessiva pari a 42.7 MW**, da ubicare nei **Comuni di Venosa e Montemilone**, in provincia di Potenza.

La presente relazione costituisce una integrazione in REV1, nella quale sono stati effettuati degli approfondimenti di dettaglio relativamente agli eventi incidentali in caso remoto di rottura degli organi rotanti.

In particolare, sono stati considerati anche degli studi di dettaglio condotti dai fornitori degli aerogeneratori (studio condotto dalla Vestas riportato in allegato).

In particolare, nel suddetto studio è riportato *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".*

Lo studio è stato redatto al fine di presentare alcuni degli elementi fondamentali per valutare la reale possibilità del distacco di una pala dagli aerogeneratori di loro produzione.

L'esperienza pratica su tutta la flotta operativa (relativa alle sole turbine considerate nel 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 riportati.

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

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

Il distacco di una delle pale dal rotore è un tipo d'incidente che comporta il distacco di una pala completa dal rotore dell'aerogeneratore, e 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.**

1.1. Generalità di calcolo

Con il presente studio si intende valutare la massima distanza (gittata) che la pala di un aerogeneratore avente **altezza hub pari a 122.5 m** e **diametro del rotore pari a 155 m** potrebbe compiere, nell'ipotesi di improvviso distacco dal punto di serraggio sul mozzo, punto maggiormente sollecitato in quanto costituisce il collegamento della pala al rotore.

Si vuole dunque individuare la massima circonferenza all'interno della quale è possibile che la pala ricada in caso di distacco dal mozzo.

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo in esame, sono le più gravose possibili, in modo da investigare nella situazione maggiormente cautelativa.

Infine si è inteso indagare il valore delle suddette gittate al variare dell'angolo di lancio α .

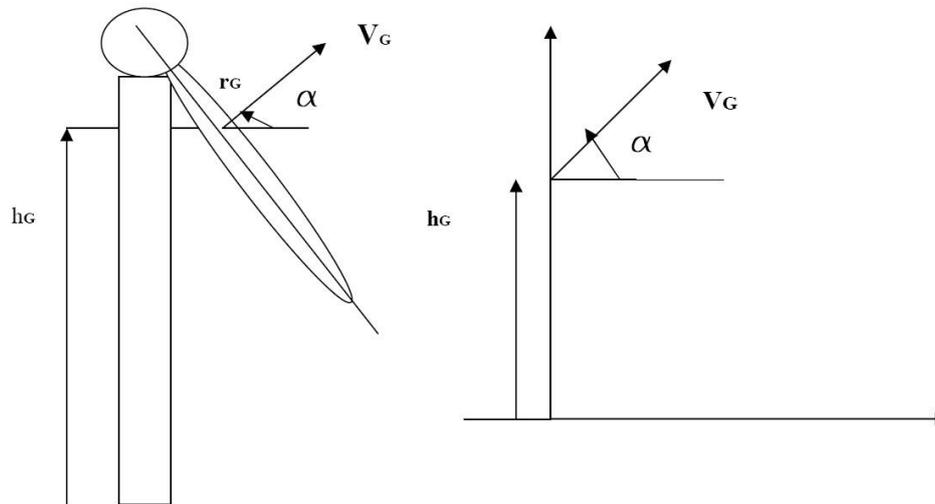
2. IPOTESI DI CALCOLO

Per il calcolo della massima gittata si considerano le seguenti ipotesi:

- Il moto del sistema considerato è quello di un sistema rigido non vincolato (modello che approssima la pala nel momento del distacco);
- Nel calcolo non sono state considerate le forze ed il momento di resistenza dovute al mezzo in cui si svolge il moto (aria). In particolare sono escluse le forze viscosse e le forze di inerzia, considerate in termini percentuali alla fine del calcolo.

Si suppone che la pala si rompa nel punto di attacco al mozzo; nella posizione tale da avere una velocità periferica inclinata con angolo α rispetto ad un sistema di riferimento orizzontale passante per il baricentro e con asse verticale parallelo all'asse della torre; come si evince dalla figura successiva.





I dati geometrici e cinematici sui quali è basato il calcolo sono i seguenti:

- Altezza della torre **H = 122.5 m**
- Diametro del rotore **D = 155 m**
- Lunghezza della pala **L= 76 m**
- Distanza baricentro-centro mozzo **r_G = 25.33 m**
- Distanza baricentro-estremità pala **w_G = 50.67 m**
- Massima velocità di rotazione **n = 12 rpm/min**

3. CALCOLO DEI DATI FONDAMENTALI

Lo schema adottato per il calcolo è il seguente, avendo indicato con G il baricentro del sistema avremo:

r_G : raggio del baricentro

V_G : velocità periferica del baricentro



Prima di effettuare il calcolo della gittata, calcoliamo dei parametri che ci serviranno per il proseguo dello stesso.

3.1. Calcolo del baricentro r_G

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, possiamo ritenere con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, cioè:

$$r_G = L : 3 = 76 : 3 = 25.33 \text{ m}$$

Conseguentemente la distanza baricentro pala-centro mozzo w_G risulta essere pari a: **50.67 m.**

3.2. Calcolo della velocità periferica del baricentro V_G

La legge con cui varia la velocità periferica v_G , ossia il dato che utilizzeremo per il calcolo, ha un andamento che varia linearmente lungo il profilo della pala con il raggio per cui la velocità periferica del baricentro sarà data dal prodotto della velocità angolare ω per la distanza del baricentro dal centro del mozzo r_G :

$$v_G = \omega * r_G = 1.26 * 25.33 = 31.91 \text{ m/s}$$

dove

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60} = \frac{2 * \pi * 12}{60} = 1.26 \text{ rad/s}$$

3.3. Calcolo di h_G

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, viene valutato al variare dell'angolo di distacco α .



Il valore di **hg** sarà quindi in funzione dell'altezza dell'intera torre meno il valore della proiezione di **rg** sulla verticale ossia:

$$\mathbf{hg} = \mathbf{H} - (\mathbf{rg} * \mathbf{cos} \mathbf{\alpha})$$

4. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

Adesso siamo in grado di esprimere la legge del moto. Supponiamo di trovarci nel caso notevole di un proiettile non puntiforme.

Le equazioni che governano il moto sono rispettivamente la prima e la seconda equazione della dinamica:

1) $\mathbf{Mg} = \mathbf{Mac}$

2) $\mathbf{0} = \mathbf{I} \frac{\mathbf{d} \mathbf{\omega}}{\mathbf{dt}}$

Supponendo di concentrare tutto il peso nel centro di massa, il momento della forza peso è nullo, avendo scelto G come polo per il calcolo dei momenti.

Pertanto la seconda equazione ci dice che il corpo durante la traiettoria che percorre, si mette a girare indisturbato intorno al suo asse principale di inerzia.

La soluzione al problema ci viene allora dalla risoluzione della prima equazione:

Questa ci evidenzia che la pala si muoverà con il moto di un proiettile puntiforme, pertanto ne compirà il caratteristico moto parabolico.

Per calcolare l'equazione della traiettoria, bisogna proiettare le caratteristiche dinamiche sui tre assi, integrarle tenendo conto delle condizioni iniziali, (velocità del baricentro al momento del distacco), e con facili calcoli giungere al valore della gittata espresso dalla seguente formula:



$$\frac{V_G^2}{g} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{2gh_G}{V_G^2 \sin^2 \alpha}} \right)$$

scegliendo ovviamente il risultato che ha senso fisicamente (il segno +) avremo al variare di α i seguenti valori:

α	X_{\max}
1	143,40
2	145,17
3	146,93
4	148,66
5	150,38
6	152,06
7	153,72
8	155,34
9	156,93
10	158,48
11	159,99
12	161,46
13	162,88
14	164,26
15	165,58
16	166,85
17	168,05
18	169,20
19	170,29
20	171,30
21	172,25
22	173,13
23	173,93
24	174,65
25	175,29
26	175,85
27	176,32



28	176,70
29	176,99
30	177,19
31	177,29
32	177,29
33	177,20
34	177,00
35	176,69
36	176,28
37	175,76
38	175,13
39	174,40
40	173,55
41	172,58
42	171,50
43	170,31
44	169,00
45	167,57
46	166,03
47	164,37
48	162,59
49	160,69
50	158,68
51	156,55
52	154,30
53	151,94
54	149,46
55	146,86
56	144,16
57	141,34
58	138,40
59	135,36
60	132,21
61	128,95
62	125,59
63	122,13
64	118,56
65	114,90



66	111,14
67	107,28
68	103,34
69	99,31
70	95,19
71	90,99
72	86,71
73	82,35
74	77,92
75	73,42
76	68,85
77	64,22
78	59,53
79	54,79
80	49,99
81	45,14
82	40,25
83	35,32
84	30,35
85	25,35
86	20,32
87	15,27
88	10,20
89	5,10

Il valore della gittata nelle condizioni più gravose, si verifica con valore di α pari a **32°** al quale corrisponde una la distanza valutata a partire dalla base della torre, in cui cade il baricentro pari a **177.29 m.**

Nota la posizione di quest'ultimo, date le caratteristiche geometriche della pala, precedentemente valutate, si può calcolare il punto in cui cade il vertice della pala stessa.

Le possibilità contemplate sono due.

Supponendo di prendere in considerazione sempre quella più pericolosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, il vertice della pala cadrà a 227.95 m.



Il valore reale, sempre in una remota ipotesi di distacco completo, va ridotto del 20% in considerazione delle forze di resistenza che si esercitano sulla pala.

Pertanto, la distanza di sicurezza in caso di rottura sarebbe pari a 182,36 m.

5. CONSIDERAZIONI

Nel corso della presente relazione è stata valutata la massima distanza (gittata) che una pala di un aerogeneratore con H hub pari a 122.5 m e rotore pari a 155 m potrebbe compiere, nell'ipotesi di improvviso distacco dal punto di serraggio sul mozzo, punto maggiormente sollecitato in quanto costituisce il collegamento della pala al rotore.

Nei calcoli, il moto del sistema è stato assimilato ad un moto di tipo irrotazionale, ipotizzando che tutto il peso della pala sia concentrato sul suo centro di massa.

Sulla base di queste ipotesi, del tutto ipotetiche e teoriche, è stato determinato un valore della gittata massima del baricentro pari a 177.29 m, corrispondente ad un angolo di lancio di 32°.

Date le caratteristiche geometriche e le condizioni suddette, il punto in cui cadrà il vertice della pala stessa, ovvero nella situazione peggiore, è pari ad una distanza massima dall'asse della turbina pari a **182,36 m**.



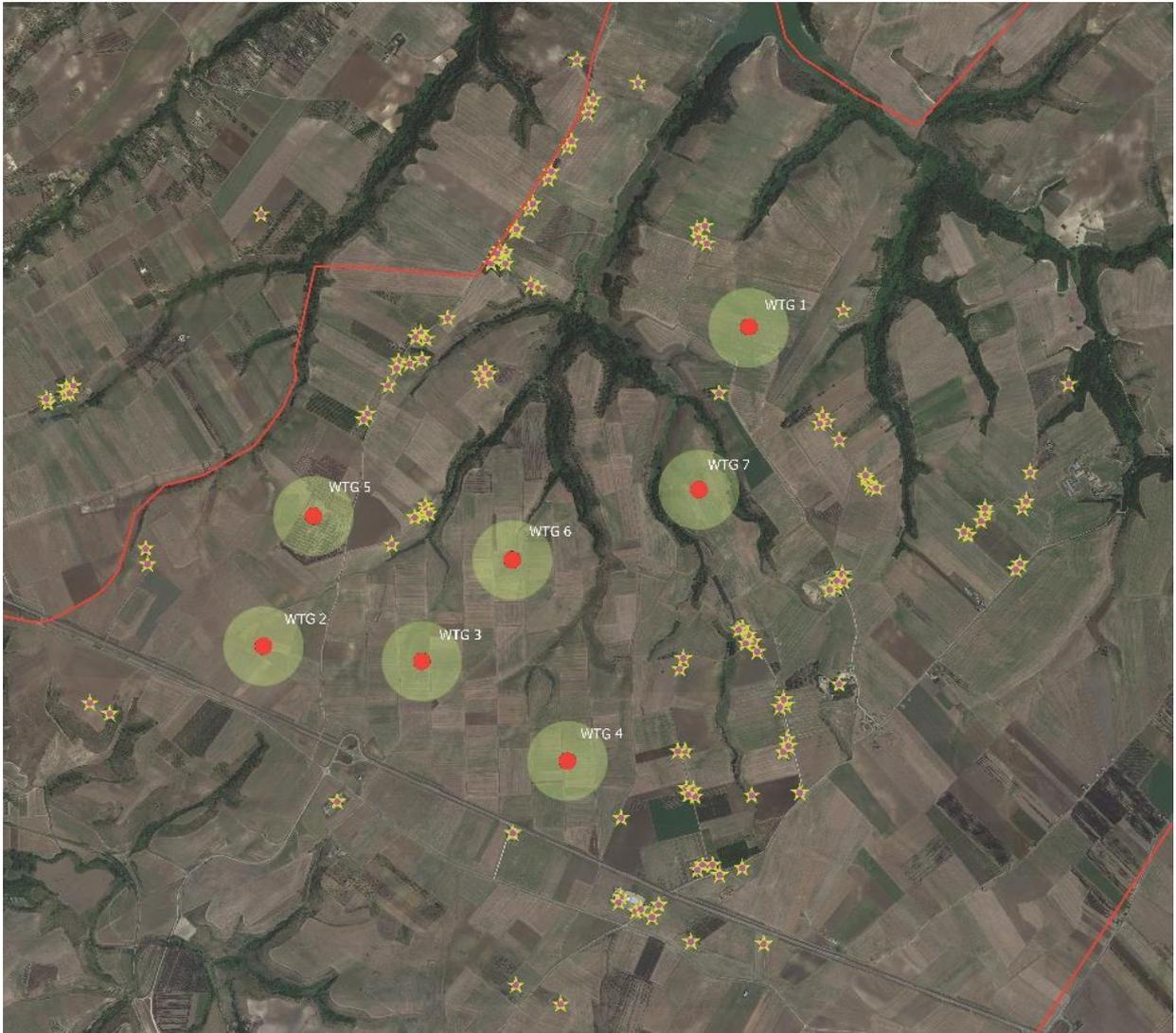
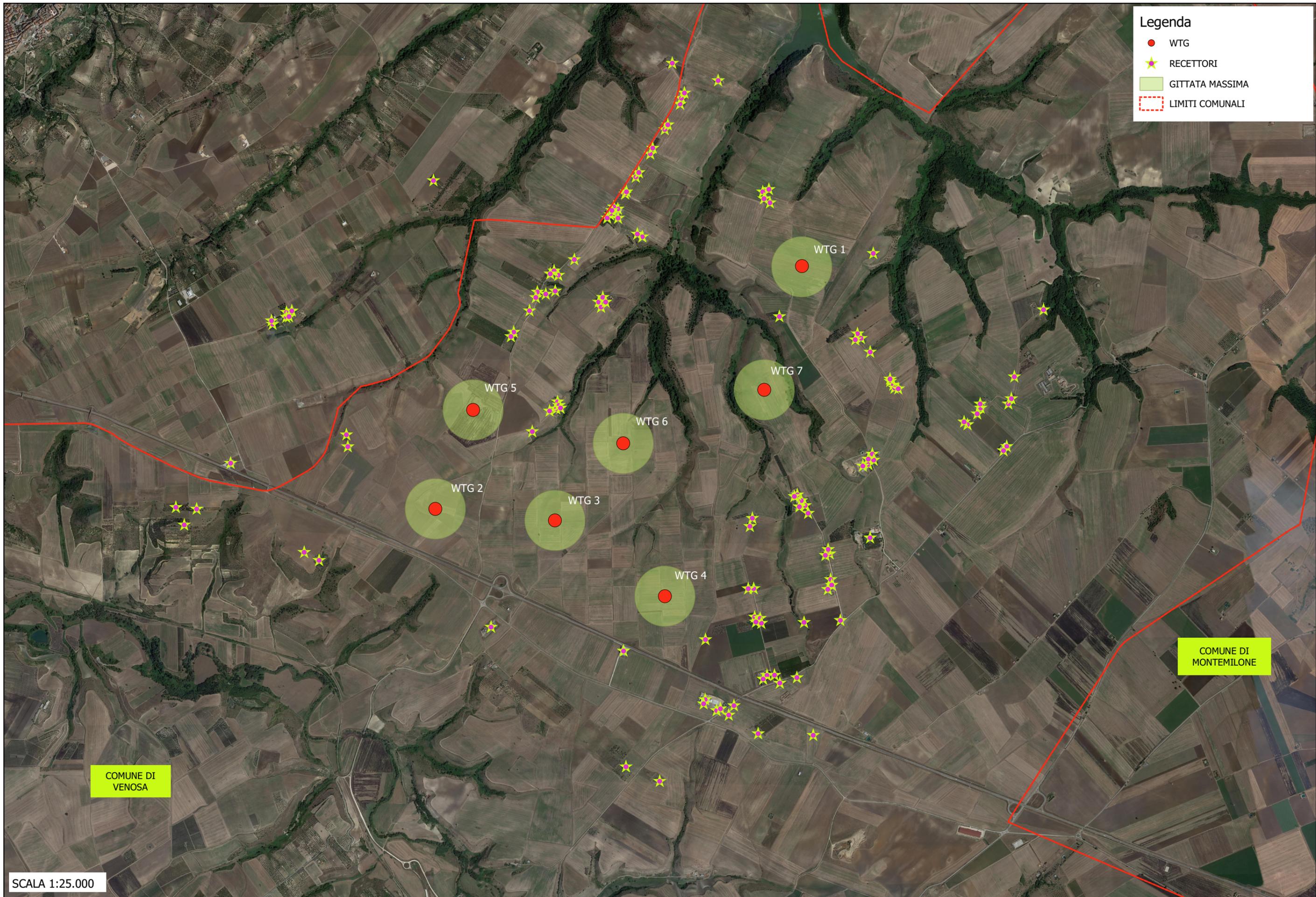


Figura 1 - Gittata massima della pala in caso di distacco - planimetria

Dalla mappa sopra riportata si evince che all'interno dell'area sopra determinata non ricadono recettori sensibili.

Alla luce delle considerazioni sopra esposte si può affermare che la realizzazione delle turbine nelle aree individuate non costituirebbe pericolo per la pubblica incolumità in caso di distacco di pala dal mozzo del rotore.





Legenda

- WTG
- ★ RECETTORI
- GITTATA MASSIMA
- ▭ LIMITI COMUNALI

COMUNE DI
VENOSA

COMUNE DI
MONTEMILONE

SCALA 1:25.000

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO
COSTITUITO DA 7 TURBINE AVENTI UNA POTENZA COMPLESSIVA DI 42.7 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RTN DA
REALIZZARSI NEI COMUNI DI VENOSA E MONTEMILONE (PZ)

Allegati Grafici
GITTATA MASSIMA

ALL01

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° (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 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° sul piano verticale (cioè 135° 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 ²	Plan area Plane XZ m ²	Plan area Plane YZ m ²	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° . La portanza in-plane è generata dalla rotazione intorno al piano XX. In questo caso si è assunto un aumento del 10% del tempo di volo dovuto alla portanza.

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

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

8 Esperienze e note statistiche

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

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

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

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

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

8.1 DISTACCO DI UNA DELLE PALE DAL ROTORE

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

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

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

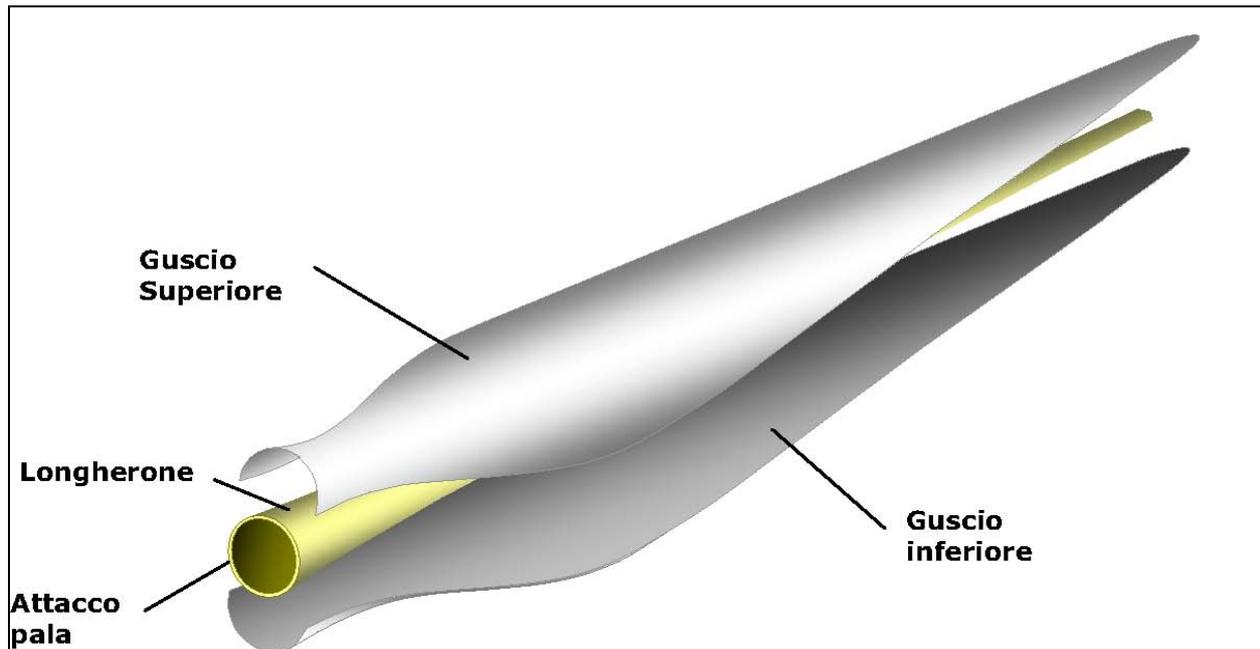


Figura 1: Schema strutturale di una pala eolica

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

L'evento si è manifestato a causa di incorretti interventi di manutenzione programmata cui l'aerogeneratore va sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore: l'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono aver determinato la rottura per fatica dei prigionieri ed al distacco della pala.

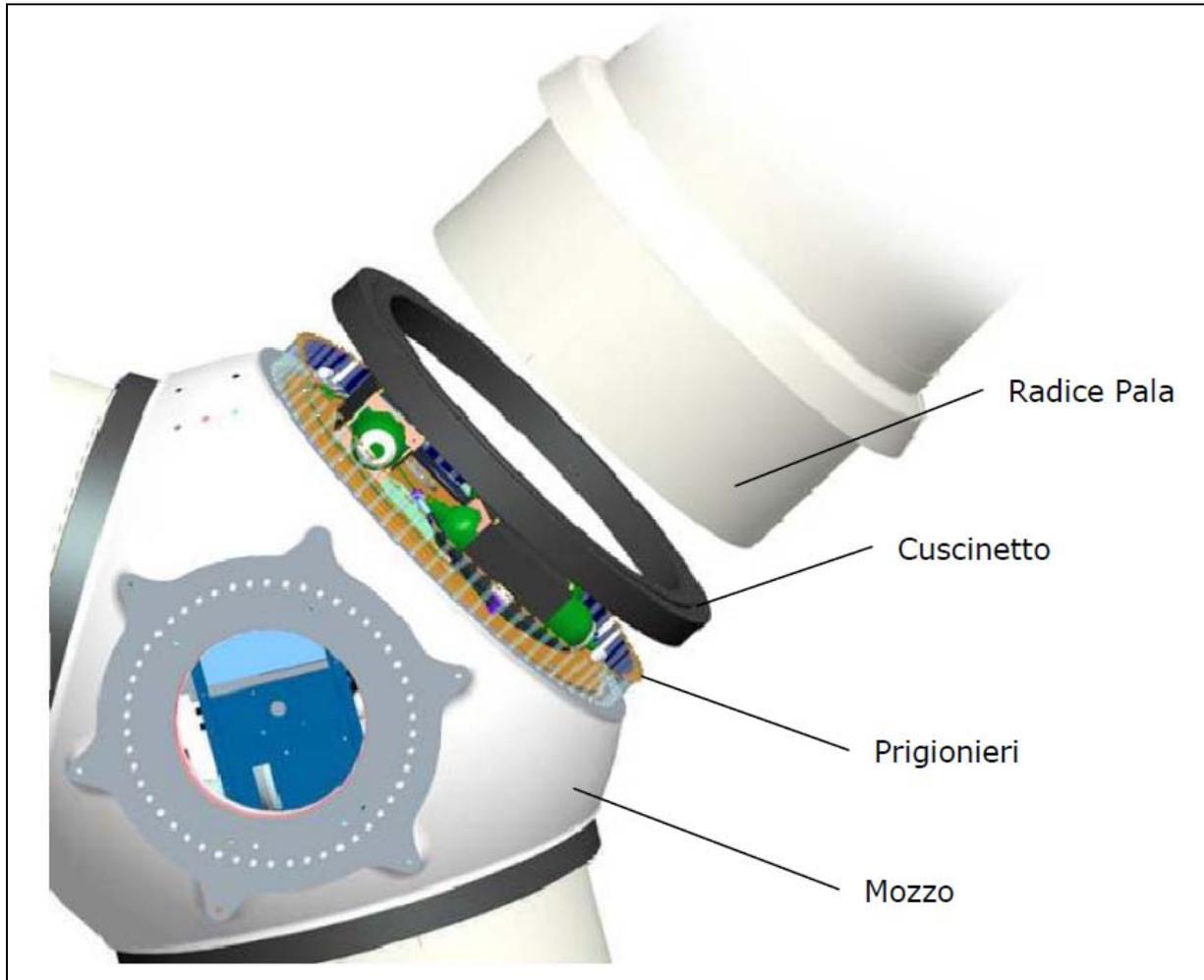


Figura 2: Dettagli dell'attacco di una pala al mozzo.

8.2 ROTTURA (APERTURA) DELL'ESTREMITÀ DI PALA

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

Tutte le pale prodotte dalla Vestas sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine costituito da recettori metallici posti all'estremità di pala e lungo l'apertura della pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale.

In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala.

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

Vestas Italia S.r.l.

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



Figura 3: Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica.

9 Conclusioni

I Casi 1, 2a, 2b e 2c dimostrano che, se la traiettoria di volo è 'irrotazionale', allora la distanza raggiunta dalla pala da 39 m (V80-2,0MW) sarà di ca. 125 m, dalla pala da 44m (V90-1,8/2,0MW) sarà di ca. 90 m, dalla pala da 44 m (V90-3,0MW) sarà di ca. 105 m, dalla pala da 49m (V100-1,8/2,0MW) sarà di ca.100 m, dalla pala da 49m (V100-2,0MW) sarà di ca.85 m, dalla pala da 49 m (V100-2,6MW) sarà di ca. 75 m, dalla pala da 54m (V110-2,0MW) sarà di ca.95 m, 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.

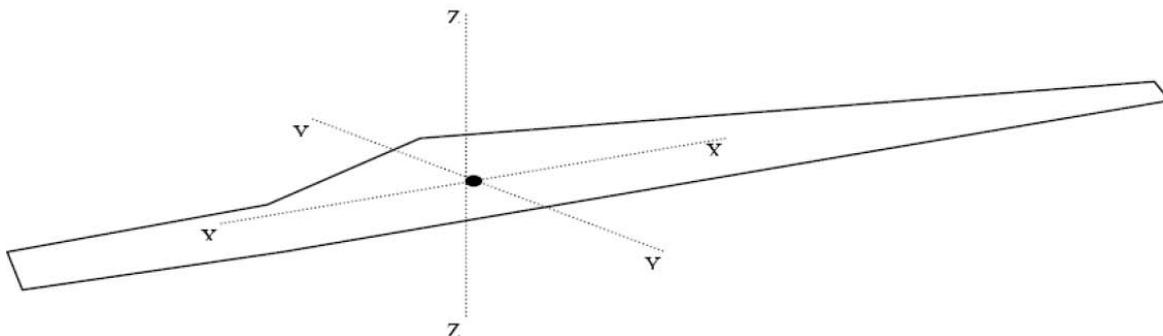


Figura 4: Sistema di coordinate usato per la pala
(YY – Flapwise; XX – Pitchwise; ZZ – Edgewise)

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, 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.