

PARCO EOLICO "SAN GAVINO MONREALE"

PROGETTO DI UN IMPIANTO EOLICO DI POTENZA PARI A 48,0 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RETE RICADENTI NEI COMUNI DI SAN GAVINO MONREALE (SU) E GUSPINI (SU).



Proponente

WIND ENERGY SAN GAVINO MONREALE S.r.l.

VIA CARAVAGGIO, 125 - 65125 PESCARA
P.IVA: 02372150686



Progettazione



Hydro Engineering s.s.
di Damiano e Mariano Galbo
via Rossotti, 39
91011 Alcamo (TP) Italy



Titolo Elaborato

Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti

LIVELLO PROGETTAZIONE	CODICE ELABORATO	FILENAME	FORMATO	SCALA
PROGETTO DEFINITIVO	SGM-SA-R009_R0		A4	-

Revisioni

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	10/2023	PRIMA EMISSIONE	VB	EG	MG

REGIONE SARDEGNA
PROVINCIA DI SUD SARDEGNA
COMUNE DI SAN GAVINO MONREALE

INDICE

1	PREMESSA	2
2	STORICO DEGLI INCIDENTI.....	3
3	CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE	4
4	AEROGENERATORE TIPO DI RIFERIMENTO	6
5	DESCRIZIONE DELL'AEROGENERATORE.....	7
6	ROTTURA PALA.....	9
6.1	FATTORI CHE INFLUENZANO LA GITTATA.....	9
6.2	MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO.....	10
6.3	ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE.....	11
6.4	DETERMINAZIONE GITTATA AEROGENERATORE D=170 M.....	14
6.5	FRAMMENTO DI PALA	20
6.6	GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DI PALA	20
7	CONCLUSIONI ROTTURA DEGLI ORGANO ROTANTI	21
8	CLASSI DI INCIDENTI	22
8.1	ROTTURA/DEFORMAZIONE DELLA TORRE E SUO SCALZAMENTO	22
8.2	EVENTI INCIDENTALI DA LANCIO DI GHIACCIO	24
8.3	EVENTI INCIDENTALI DI VARIA NATURA	24
8.4	FULMINAZIONI E FUOCO	24
8.5	INCIDENTI CON L'INFLUENZA SULL' AMBIENTE.....	25
8.6	INCIDENTI PER PRESENZA FISICA DELL'AEROGENERATORE	26
8.7	DANNI PER L'AVIFAUNA	26
8.8	DANNI CONSEGUENTI AD OGGETTI ESTERNI	27
8.9	INCIDENTI MECCANICI	28
8.10	ROTTURA DELLA PALA.....	28
8.11	GITTATA DI UN CORPO ROTANTE	32
9	PROBABILITA' DI ACCADIMENTO	33
10	SCHEDA TECNICA DELL'AEROGENERATORE SG170.....	37

1 PREMESSA

La società Hydro Engineering s.s. è stata incaricata di redigere il progetto definitivo dell'impianto eolico denominato "San Gavino Monreale" composto da 8 aerogeneratori, ciascuno di potenza nominale pari a 6,0 MW, per una potenza complessiva di 48 MW, ubicato nel comune di San Gavino Monreale e nel Comune di Guspini per le sole opere di connessione alla rete, Provincia di Sud Sardegna e proposto dalla società WIND ENERGY SAN GAVINO MONREALE S.r.l. con sede in Pescara via Caravaggio, 125.

Il modello tipo di aerogeneratore scelto avrà potenza nominale di 6,0 MW con altezza mozzo pari a 115,0 m, diametro rotore pari a 170 m e altezza massima al top della pala pari a 200 m. Questa tipologia di aerogeneratore è allo stato attuale quella ritenuta più idonea per il sito di progetto dell'impianto.

La presente relazione costituisce lo studio della distanza massima raggiungibile dalla rottura di una pala o di un frammento di essa (gittata massima).

In qualsiasi caso, la gittata massima e la velocità all'impatto sono dei fattori determinanti per la stima del rischio. Il calcolo presenta alcune complessità in quanto le variabili in gioco sono numerose ed il risultato può essere soltanto di tipo probabilistico in quanto legato alle modalità ed al momento del distacco. Infatti, un corpo lanciato in aria in presenza di forte vento potrebbe dar luogo ad effetti di "portanza" che possono prolungare i tempi di volo. L'effetto viscoso dell'aria, d'altra parte, ha un effetto opposto frenando il corpo stesso. Considerando, quindi, la natura della pala avente un profilo aerodinamico, lo studio del moto risulta complesso, a causa di tutte le forze e dei momenti che nascono al momento del distacco e nell'interazione col vento.

2 STORICO DEGLI INCIDENTI

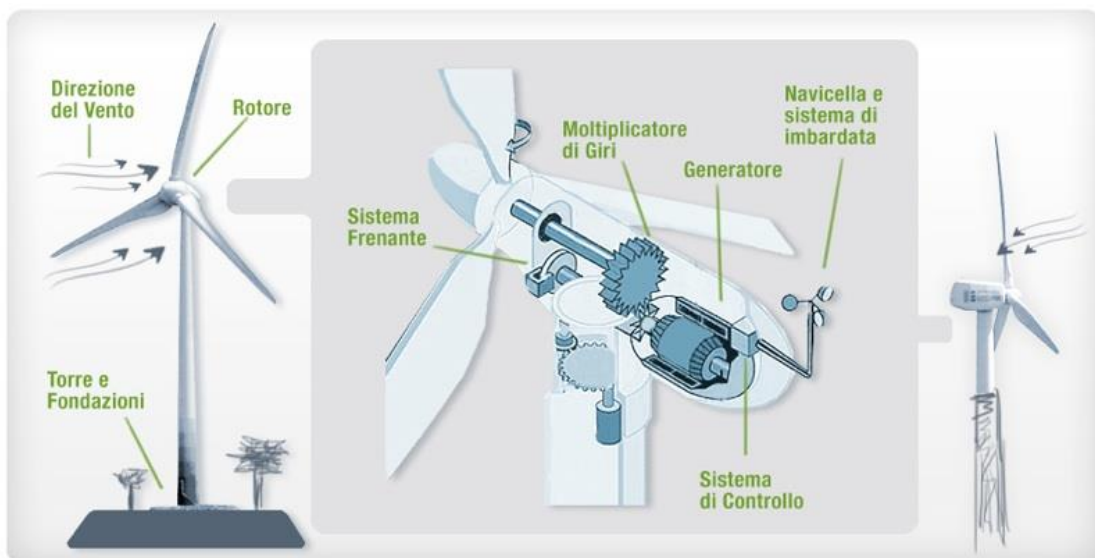
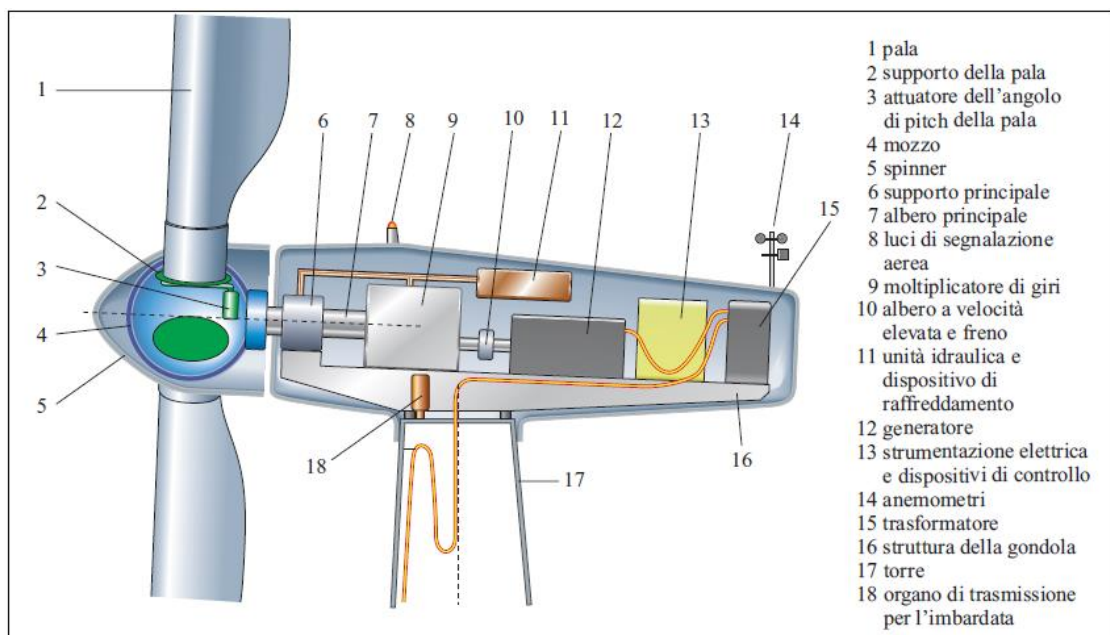
Il tasso d'incidentalità, nell'ultimo decennio, è ancora diminuito a seguito dell'evoluzione tecnologica e del miglioramento delle macchine eoliche, malgrado l'aumento medio delle loro dimensioni.

Uno studio danese ha condotto su 18 mesi, tra il 1998 e i 1999, un'analisi riguardante le pale, le navicelle e le torri di 2.130 rotori, per una produzione complessiva di 540 MW. Su 3.195 anni cumulati di funzionamento, solo 7 incidenti hanno comportato la distruzione delle pale. Il tasso è dunque di un incidente ogni 457 anni-macchina. Si noti che la Danimarca presenta maggiori rischi di guasti e di sospensione della produzione a causa della presenza di brina e di ghiaccio.

Un altro studio danese a partire da dati registrati su 120 mesi tra il 1993 e il 2003 in un parco di 1.912 impianti mostra una probabilità di distruzione di 0,00083 impianti per anno. In ambito rurale, la correlazione di questa statistica ($8,3 \times 10^{-4}$ /anno) con la probabilità di occupazione di un m² di terreno da parte di una persona individua una probabilità globale di ferire qualcuno molto bassa.

3 CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

Le pale di un aerogeneratore sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore. Vi è un sistema di controllo aerodinamico, chiamato imbardata, che permette il controllo della potenza durante la rotazione delle pale intorno al loro asse principale, modificando l'orientamento rispetto alla direzione del vento, per offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo, indipendentemente dalla direzione del vento, un verso orario di rotazione. Si riporta di seguito una figura esemplificativa che evidenzia il funzionamento del sistema meccanico dell'aerogeneratore e il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento.



Relazione tra direzione del vento e rotazione delle pale.

Questa considerazione servirà per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale e a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano.

Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva che individua la direzione del moto del corpo che si distacca. Mettendo in relazione tale traiettoria con la corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può rappresentare un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.

4 AEROGENERATORE TIPO DI RIFERIMENTO

Le macchine di riferimento per il calcolo avranno le seguenti caratteristiche:

ROTORE

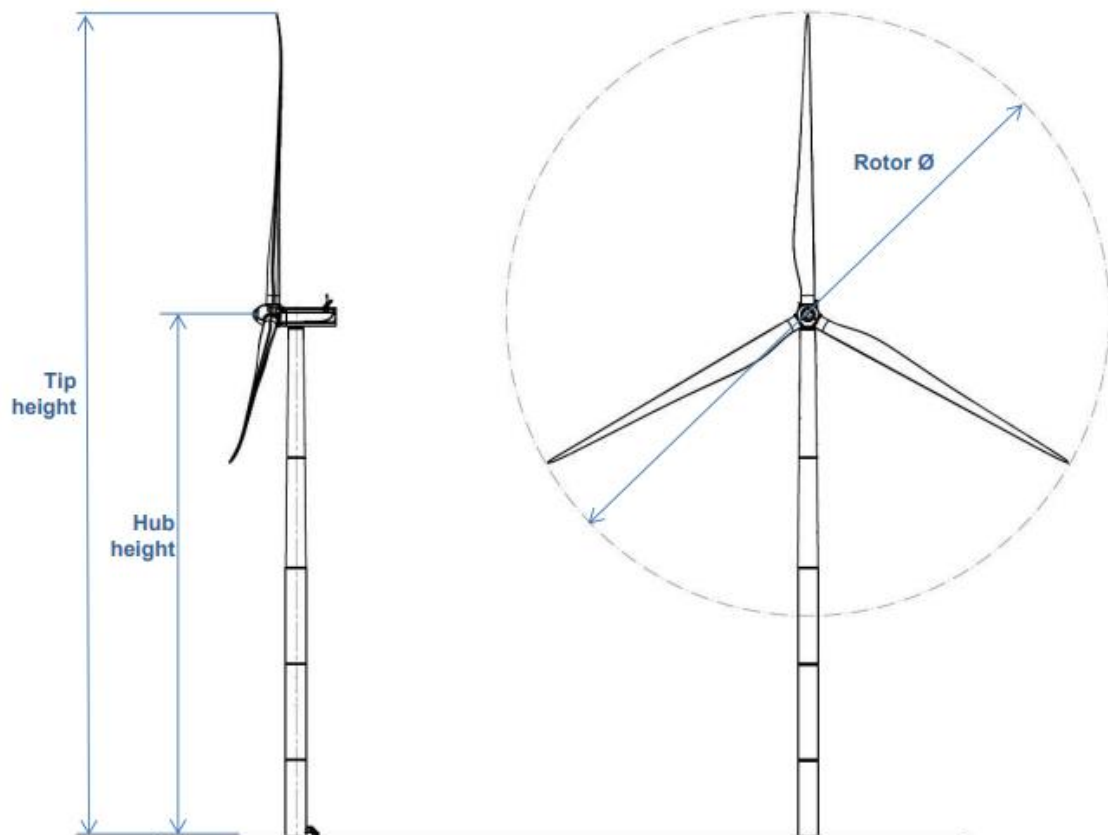
- diametro 170 m
- area spazzata 22.698 m²
- velocità di rotazione massima 10,6 rpm
- numero pale 3
- altezza mozzo 115 m

TORRE

- tipo: tubolare
- struttura: sezioni collegate tramite flangiatura
- altezza complessiva 200 m

FUNZIONAMENTO

- cut-out 25 m/s (velocità del rotore gradualmente ridotta)
- cut-in 3 m/s
- Potenza 6,0 MW



5 DESCRIZIONE DELL'AEROGENERATORE

L'aerogeneratore è una macchina che sfrutta l'energia cinetica posseduta del vento, per la produzione di energia elettrica, descritta nell'elaborato SGM-PD-R01-Relazione tecnica.

Sul mercato esistono diverse tipologie di aerogeneratori, ad asse orizzontale e verticale, con rotore mono, bi o tripala, posto sopra o sottovento. Il tipo di aerogeneratore previsto per l'impianto in oggetto è un aerogeneratore ad asse orizzontale con rotore tripala e una potenza massima di 6000 KW, le cui caratteristiche principali sono di seguito riportate:

- rotore tripala a passo variabile, di diametro di 170 m, posto sopravvento al sostegno, in resina epossidica rinforzata con fibra di vetro, con mozzo rigido in acciaio;
- navicella in carpenteria metallica con carenatura in vetroresina e lamiera, in cui sono collocati il generatore elettrico e le apparecchiature idrauliche ed elettriche di comando e controllo;
- sostegno tubolare troncoconico in acciaio, avente altezza fino all'asse del rotore al pari a 115 m.

L'altezza complessiva dell'aerogeneratore è pari a 200 m.

I tronchi di torre sono realizzati da lastre in acciaio laminate, saldate per formare una struttura tubolare troncoconica.

Si tratta di aerogeneratori di ultima generazione, già impiegati estesamente in altri parchi italiani/UE, che consentono il miglior sfruttamento della risorsa vento e che presentano garanzie specifiche dal punto di vista della sicurezza.

La turbina viene di solito equipaggiata, in accordo alle disposizioni dell'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile), con un sistema di segnalazione diurna e notturna per la segnalazione aerea secondo normativa di sicurezza.

La segnalazione notturna di solito consiste nell'utilizzo di una luce rossa da installare sull'estradosso della navicella dell'aerogeneratore.

La segnalazione diurna consiste di solito nella verniciatura della parte estrema della pala con tre bande di colore rosso ciascuna di 6 m per un totale di 18 m.

La navicella è dotata di un sistema antincendio, che consiste di rilevatori di fumo e CO, i quali rivelano gli incendi e attivano un sistema di spegnimento ad acqua atomizzata ad alta pressione nel caso di incendi dei componenti meccanici e a gas inerte (azoto) nel caso di incendi dei componenti elettrici (cabine elettriche e trasformatore). In aggiunta a ciò, il rivestimento della navicella contiene materiali autoestinguenti.

L'aerogeneratore è dotato di un completo sistema antifulmine, in grado di proteggere da danni diretti ed indiretti sia alla struttura (interna ed esterna) che alle persone. Il fulmine viene "catturato" per mezzo di un sistema di conduttori integrati nelle pale del rotore, disposti ogni 5 metri per tutta la lunghezza della pala. Da questi, la corrente del fulmine è incanalata attraverso un sistema di conduttori a bassa impedenza fino al sistema di messa a terra. La

corrente di un eventuale fulmine è scaricata dal rotore e dalla navicella alla torre tramite collettori ad anelli e scaricatori di sovratensioni. La corrente del fulmine è infine scaricata a terra tramite un dispersore di terra. I dispositivi antifulmine previsti sono conformi agli standard della più elevata classe di protezione (Classe I), secondo lo standard internazionale IEC 61024-1.

6 ROTTURA PALA

Le modalità di rottura della pala possono essere assai diverse. Essendo un organo in rotazione è soggetto alla forza centripeta che va equilibrata con l'azione della struttura della torre stessa. Per minimizzare tale forza, la pala è costruita in materiale leggero; normalmente si utilizzano materiali compositi che sfruttano le caratteristiche meccaniche così da far fronte ai carichi aerodinamici imposti.

Le modalità di rottura sono classificabili in due gruppi:

- 1) Rottura della pala alla radice.
- 2) Rottura di frammento.

6.1 FATTORI CHE INFLUENZANO LA GITTATA

Da un punto di vista teorico, non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore della pala o della sezione di pala distaccata, si avrebbe nel caso di distacco in corrispondenza della posizione palare pari a 45 gradi e di moto a “giavelotto” del frammento. Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di un moto a giavelotto è praticamente impossibile: le forze di resistenza viscosa, le azioni resistive del vento ed il moto di rotazione complesso dovuto al profilo aerodinamico della pala/frammento-di-pala, si oppongono al moto e riducono il tempo e la distanza di volo.

La traiettoria iniziale della pala/sezione-di-pala distaccata è determinata principalmente dall'angolo in corrispondenza del quale avviene il distacco e dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia. Per quanto riguarda le forze di tipo aerodinamico e relativi momenti, queste agiranno sulla pala/sezione-di-pala influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

Il tempo di volo generalmente è determinato:

- dalla componente verticale della velocità iniziale posseduta dalla pala/sezione di pala immediatamente dopo il distacco, in corrispondenza del suo punto baricentrico;
- dalla posizione rispetto al suolo;
- dall'accelerazione verticale;
- dalle forze di attrito agenti sulla pala/sezione di pala stessa.

Il tempo di volo che si deduce da tali considerazioni è utilizzato successivamente per il calcolo della distanza.

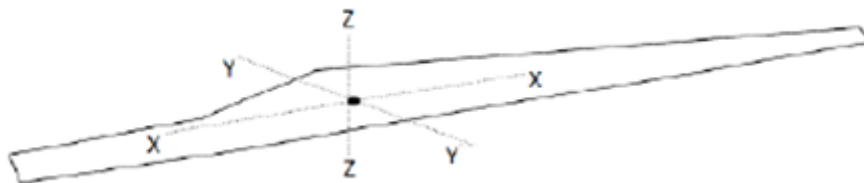
Distanza percorsa

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

- dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco;
- dalla velocità del vento nel momento del distacco;
- dalle forze di attrito che agiscono sulla pala/sezione-di-pala in volo;
- dal tempo di volo.

6.2 MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO

Il moto reale della parte distaccata risulta molto complesso, poiché dipendente, come detto, dalle caratteristiche aerodinamiche di questa e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala). I casi puramente teorici di rottura e di volo con moto “a giavellotto” sono da ritenere, come accennato, poco realistici data la complessità aerodinamica della pala e la presenza dell'azione del vento. Il modello teorico che meglio caratterizza il moto delle parti (siano esse sezioni di pala e la pala intera) che hanno subito il distacco, e che più si avvicina al caso reale, è il modello “Complex Rotational Motion”, che permette di studiare il moto nel suo complesso, considerando i moti di rotazione intorno agli assi xx , yy , zz .



La rotazione della pala intorno all'asse zz è causata dalla conservazione del momento della quantità di moto: in caso di rottura, per il principio di conservazione, il generico spezzone tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano. La rotazione intorno agli altri assi è dovuta alle azioni indotte dal vento incidente out of plane sulla pala/sezione di pala.

In particolare, si genera:

- un momento intorno all'asse yy : centro di massa e centro aerodinamico della pala/sezione di pala non coincidono;
- un momento intorno all'asse xx : centro di massa della sezione di pala lungo la corda e il centro aerodinamico non coincidono.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di distacco/lancio e dalle forze inerziali agenti sulla pala/frammento di pala: al momento del distacco, oltre all'impulso, agiscono anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise. Pertanto, il moto della parte distaccata sarà un moto rotazionale, su cui agisce anche la forza di gravità. La resistenza offerta dalla pala al moto sia *in plane* che *out plane* è generata dalla rotazione intorno agli assi xx e yy .

La massima gittata della pala/frammento di pala è strettamente dipendente:

- dal numero di giri del rotore e quindi dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;
- dalla posizione della pala nel momento del distacco;
- dalla dimensione del frammento;
- dal peso del frammento (più leggero è, più il suo moto è limitato dalle forze di attrito viscoso);
- dal profilo aerodinamico della pala/frammento di pala.

Possiamo pertanto concludere che:

- se effettuiamo un calcolo che tenga conto dei valori cinematici e geometrici del moto senza considerare gli effetti viscosi e soprattutto la complessità del moto rotazionale otteniamo valori di gittata più alti di quelli reali (valore teorico > valore reale)
- più che dalle dimensioni dell'aerogeneratore e dell'altezza della torre, i valori della gittata dipendono dalla velocità di rotazione.

6.3 ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE

La rottura della pala alla radice è un evento che storicamente è risultato probabile (rispetto al numero di rotture totali) in quanto la sezione di attacco risulta assai “critica” dal punto di vista strutturale.

Le cause sono sostanzialmente due:

1. La discontinuità della struttura che passa da un carico distribuito sulle fibre alla flangia di attacco crea inevitabili concentrazioni tensionali che con l'andare del tempo possono creare problemi di affaticamento con conseguente rottura. C'è da dire che i costruttori hanno ben chiaro il problema e che negli ultimi anni si sono introdotti diversi accorgimenti che hanno migliorato di molto le prestazioni;
2. La rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo. Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni serrati opportunamente durante l'installazione della turbina.

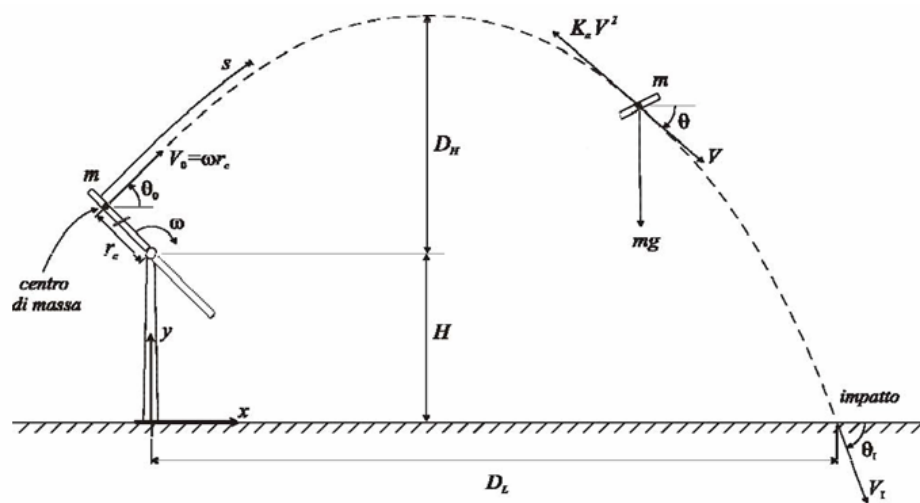
Il precarico conferito ai bulloni durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei bulloni stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

L'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono determinare la rottura per fatica dei bulloni e di conseguenza il possibile distacco della pala.

Per la stima della gittata massima dell'intera pala si impongono alcune ipotesi semplificative:

- 1) distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;
- 2) baricentro posizionato ad $1/3$ della lunghezza della pala;
- 3) assenza di attriti viscosi durante il volo: questa ipotesi risulta conservativa

- considerando che in letteratura si registra, a causa degli effetti di attrito, una diminuzione del tempo di volo anche del 20%;
- 4) distacco in corrispondenza di un angolo di 60° rispetto all'orizzontale, che dal punto di vista teorico garantisce la massima gittata (moto in senso orario);
 - 5) distacco alla rotazione di funzionamento massima;
 - 6) vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
 - 7) assenza di effetti di "portanza" del profilo alare.



Traiettoria della pala

Equazioni del moto applicate:

Le equazioni del moto di un punto materiale soggetto solo alla forza di gravità sono

$$x'' = 0$$

$$y'' = -g$$

dove $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità. La legge del moto, soluzione di queste equazioni è:

$$x(t) = x_0 + v_x t$$

$$y(t) = y_0 + v_y t + 1/2 g t^2$$

dove $(x_0; y_0)$, è la posizione iniziale del punto materiale e $(v_x; v_y)$ è la sua velocità.

La velocità V_0 ha due componenti:

$$v_x = V_0 \cos \theta$$

$$v_y = V_0 \sin \theta$$

La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo T tale che $Y(T)=0$; dalla legge del moto si ottiene

$$T = v_y/g + 1/g \sqrt{v_y^2 + 2y_0g}$$

scartando la soluzione corrispondente a tempi negativi.

Consideriamo il moto bidimensionale dell'elemento rotante, come il moto di un punto materiale concentrato nel baricentro, tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento. Chiamiamo con n il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare. Tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a 2π radianti, per n giri avremo $2\pi n$ radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare ω del corpo in movimento. Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

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

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ad una distanza dal centro di rotazione pari a circa $r_g = 28,33$ m essendo il diametro del rotore $D = 170$ m ed il raggio di ciascuna pala $R = 85,0$ m circa.

Per determinare la velocità del baricentro della pala basta moltiplicare la distanza del baricentro dal centro di rotazione per la velocità angolare. Il numero di giri valutato per questa analisi è pari a 10,6 giri/minuto (massimo per il tipo di aerogeneratore di progetto). Per questa velocità angolare, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$V_g = \omega r_g = 2\pi n/60 r_g = 31,43 \text{ m/sec}$$

Per tenere conto degli effetti attritivi dell'area, tale valore viene realisticamente ridotto in fase di calcolo di un'aliquota pari al 10%, pertanto la V_g di calcolo sarà pari a $V_{g^*} = 27,98$ m/s. La posizione e la velocità iniziale sono determinati, oltre che dalla velocità tangenziale appena calcolata, anche dall'angolo θ della pala al momento del distacco.

Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$x_0 = -r_g \cos(\theta);$$

$$y_0 = H + r_g \sin(\theta);$$

$$v_x = V_g \sin(\theta);$$

$$v_y = V_g \cos(\theta).$$

La gittata L è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo della pala; l'altezza H è l'altezza del mozzo della torre (115 m). Dalla legge del moto otteniamo:

$$L = X(t)$$

Sostituendo l'espressione ricavata per T , otteniamo la gittata L in termini di V_g e di θ :

$$\text{Gittata max: } v_{x0} * (-v_{y0} * (v_{y0}^2 - 4(1/2H_g g)) / g$$

6.4 DETERMINAZIONE GITTATA AEROGENERATORE D=170 M

L'applicazione delle formule sopra descritte ha portato alla determinazione del valore di gittata massima di seguito esposto.

Dati di input:

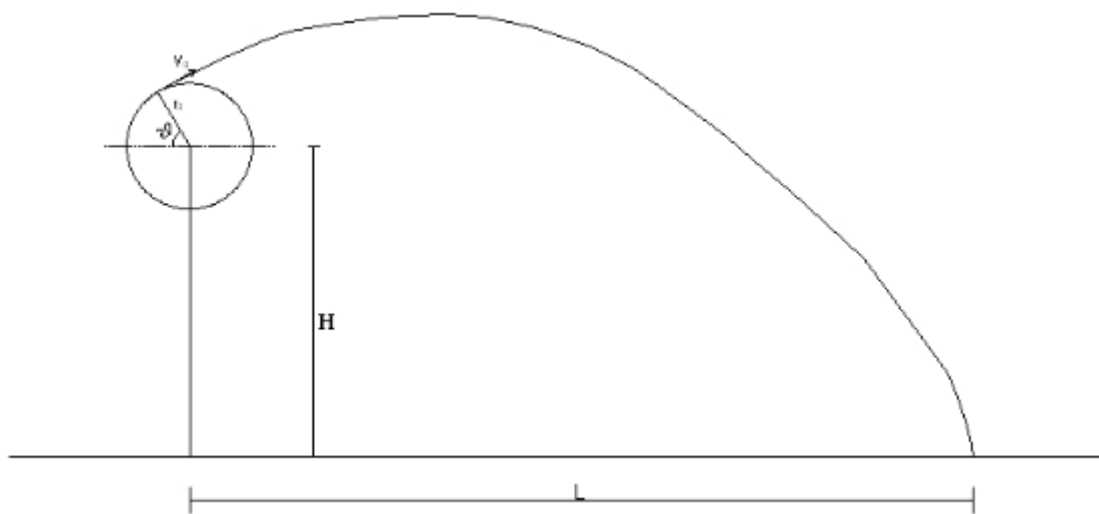
$$V_{g,calc} = 27,98 \text{ m/s};$$

$$r_g = 28,33 \text{ m};$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2;$$

$$H = 115 \text{ m}.$$

Il valore della gittata dipenderà dall'angolo ϑ .



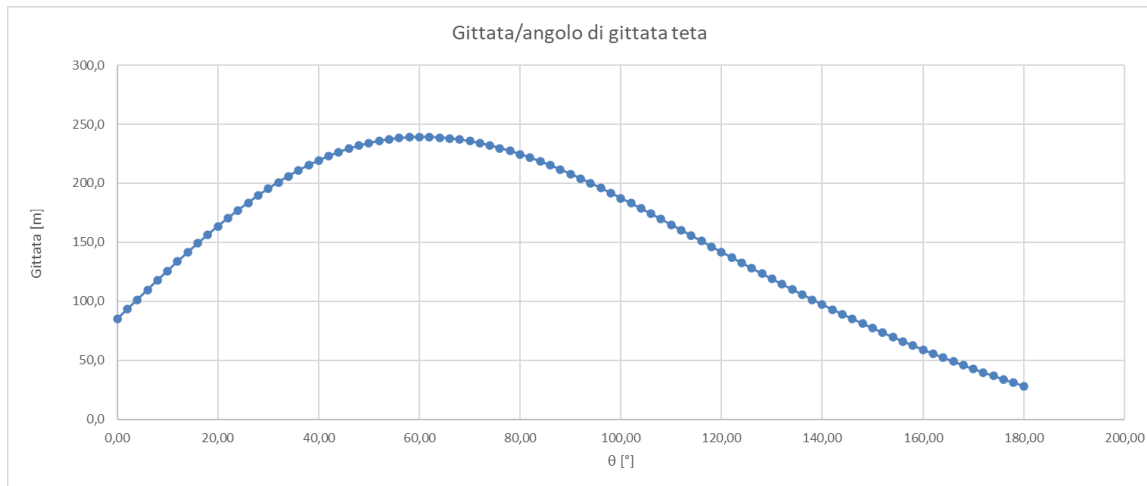
Si noti che fissato un generico angolo ϑ , la gittata aumenta quadraticamente con V_g salvo i casi particolari $\vartheta = \pm 90^\circ$, $\vartheta = 0^\circ$, $\vartheta = 180^\circ$, nei quali la gittata aumenta linearmente con V oppure è pari a r_g . Come si evidenzia dal grafico e numericamente dalla tabella sotto riportata il valore massimo della gittata è pari a 268,32 m circa con un angolo di distacco di circa $\vartheta = \pi/3 \text{ rad.}$ e più precisamente pari a 60° . A tale valore dovrà aggiungersi la distanza del vertice della pala dal baricentro pari a 56,67 m e la posizione dell'ascissa del punto di distacco a partire dall'asse dell'aerogeneratore, per un valore complessivo della gittata: $L_{tot} \cong 239,1 \text{ m}$.

g	n [l]	ω [rad/s]	r_g [m]	D [m]	R [m]	V_0^* [m/s]	V_0 [m/s]	V_{0e}	θ [°]	θ [rad]	Hrot [m]	Yg [m]	Hg [m]	Lg [m]	Gmax [m]	Xg [m]	G_{rot} [m]
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	27,98	0,00	0,00	115,00	0,00	115,00	56,67	0,00	28,33	85,0
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	27,96	0,98	2,00	115,00	0,99	115,99	56,67	8,29	28,32	93,3
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	27,91	1,95	4,00	115,00	1,98	116,98	56,67	16,58	28,26	101,5
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	27,82	2,92	6,00	115,00	2,96	117,96	56,67	24,86	28,18	109,7
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	27,70	3,89	8,00	115,00	3,94	118,94	56,67	33,10	28,06	117,8
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	27,55	4,86	10,00	115,00	4,92	119,92	56,67	41,27	27,90	125,8
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	27,37	5,82	12,00	115,00	5,89	120,89	56,67	49,35	27,71	133,7
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	27,15	6,77	14,00	115,00	6,85	121,85	56,67	57,31	27,49	141,5
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	26,89	7,71	16,00	115,00	7,81	122,81	56,67	65,14	27,24	149,0
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	26,61	8,65	18,00	115,00	8,76	123,76	56,67	72,80	26,95	156,4
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	26,29	9,57	20,00	115,00	9,69	124,69	56,67	80,28	26,62	163,6
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	25,94	10,48	22,00	115,00	10,61	125,61	56,67	87,55	26,27	170,5
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	25,56	11,38	24,00	115,00	11,52	126,52	56,67	94,60	25,88	177,2
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	25,15	12,26	26,00	115,00	12,42	127,42	56,67	101,41	25,47	183,5
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	24,70	13,13	28,00	115,00	13,30	128,30	56,67	107,95	25,02	189,6
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	24,23	13,99	30,00	115,00	14,17	129,17	56,67	114,21	24,54	195,4
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	23,73	14,83	32,00	115,00	15,01	130,01	56,67	120,19	24,03	200,9
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	23,19	15,64	34,00	115,00	15,84	130,84	56,67	125,85	23,49	206,0
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	22,63	16,44	36,00	115,00	16,65	131,65	56,67	131,20	22,92	210,8
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	22,05	17,22	38,00	115,00	17,44	132,44	56,67	136,22	22,33	215,2
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	21,43	17,98	40,00	115,00	18,21	133,21	56,67	140,91	21,70	219,3
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	20,79	18,72	42,00	115,00	18,96	133,96	56,67	145,25	21,06	223,0
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	20,13	19,43	44,00	115,00	19,68	134,68	56,67	149,23	20,38	226,3
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	19,43	20,13	46,00	115,00	20,38	135,38	56,67	152,87	19,68	229,2
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	18,72	20,79	48,00	115,00	21,06	136,06	56,67	156,14	18,96	231,8
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	17,98	21,43	50,00	115,00	21,70	136,70	56,67	159,06	18,21	233,9
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	17,22	22,05	52,00	115,00	22,33	137,33	56,67	161,62	17,44	235,7
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	16,44	22,63	54,00	115,00	22,92	137,92	56,67	163,82	16,65	237,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	15,64	23,19	56,00	115,00	23,49	138,49	56,67	165,66	15,84	238,2
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	14,83	23,73	58,00	115,00	24,03	139,03	56,67	167,16	15,01	238,8
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	13,99	24,23	60,00	115,00	24,54	139,54	56,67	168,32	14,17	239,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	13,13	24,70	62,00	115,00	25,02	140,02	56,67	169,13	13,30	239,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	12,26	25,15	64,00	115,00	25,47	140,47	56,67	169,62	12,42	238,7

g	n [/]	ω [rad/s]	r_g [m]	D [m]	R [m]	V_0^* [m/s]	V_0 [m/s]	v_{x0}	v_{y0}	θ [°]	ϑ [rad]	Hrot [m]	Yg [m]	Hg [m]	L_G [m]	Gmax [m]	Xg [m]	G_{TOT} [m]
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-20,76	24,74	130,00	2,27	115,00	21,70	136,70	56,67	88,36	-18,21	126,81
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-21,61	24,00	132,00	2,30	115,00	21,06	136,06	56,67	84,14	-18,96	121,85
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-22,43	23,23	134,00	2,34	115,00	20,38	135,38	56,67	79,98	-19,68	116,97
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-23,23	22,43	136,00	2,37	115,00	19,68	134,68	56,67	75,88	-20,38	112,16
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-24,00	21,61	138,00	2,41	115,00	18,96	133,96	56,67	71,83	-21,06	107,44
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-24,74	20,76	140,00	2,44	115,00	18,21	133,21	56,67	67,83	-21,70	102,79
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-25,45	19,88	142,00	2,48	115,00	17,44	132,44	56,67	63,90	-22,33	98,24
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-26,13	18,98	144,00	2,51	115,00	16,65	131,65	56,67	60,02	-22,92	93,77
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-26,77	18,06	146,00	2,55	115,00	15,84	130,84	56,67	56,21	-23,49	89,38
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-27,39	17,11	148,00	2,58	115,00	15,01	130,01	56,67	52,45	-24,03	85,09
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-27,97	16,15	150,00	2,62	115,00	14,17	129,17	56,67	48,76	-24,54	80,89
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-28,51	15,16	152,00	2,65	115,00	13,30	128,30	56,67	45,12	-25,02	76,77
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-29,03	14,16	154,00	2,69	115,00	12,42	127,42	56,67	41,55	-25,47	72,75
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-29,50	13,14	156,00	2,72	115,00	11,52	126,52	56,67	38,03	-25,88	68,81
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-29,94	12,10	158,00	2,76	115,00	10,61	125,61	56,67	34,57	-26,27	64,97
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-30,35	11,05	160,00	2,79	115,00	9,69	124,69	56,67	31,17	-26,62	61,21
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-30,71	9,98	162,00	2,83	115,00	8,76	123,76	56,67	27,82	-26,95	57,54
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-31,04	8,90	164,00	2,86	115,00	7,81	122,81	56,67	24,53	-27,24	53,96
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-31,34	7,81	166,00	2,90	115,00	6,85	121,85	56,67	21,30	-27,49	50,47
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-31,59	6,71	168,00	2,93	115,00	5,89	120,89	56,67	18,11	-27,71	47,06
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-31,80	5,61	170,00	2,97	115,00	4,92	119,92	56,67	14,98	-27,90	43,74
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-31,98	4,49	172,00	3,00	115,00	3,94	118,94	56,67	11,89	-28,06	40,50
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-32,12	3,38	174,00	3,04	115,00	2,96	117,96	56,67	8,85	-28,18	37,34
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-32,22	2,25	176,00	3,07	115,00	1,98	116,98	56,67	5,86	-28,26	34,26
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-32,28	1,13	178,00	3,11	115,00	0,99	115,99	56,67	2,91	-28,32	31,26
-9,81	12,10	1,27	28,33	170,00	85,00	32,29	35,88	-32,29	0,00	180,00	3,14	115,00	0,00	115,00	56,67	0,00	-28,33	28,33

g	n [/]	ω [rad/s]	r_g [m]	D [m]	R [m]	V_o^* [m/s]	V_o [m/s]	v_{x0}	v_{y0}	ϑ [°]	ϑ [rad]	Hrot [m]	Yg [m]	Hg [m]	L_G [m]	Gmax [m]	Xg [m]	G_{TOT} [m]
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	11,38	25,56	66,00	1,15	115,00	25,88	140,88	56,67	169,79	11,52	238,0
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	10,48	25,94	68,00	1,19	115,00	26,27	141,27	56,67	169,66	10,61	236,9
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	9,57	26,29	70,00	1,22	115,00	26,62	141,62	56,67	169,22	9,69	235,6
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	8,65	26,61	72,00	1,26	115,00	26,95	141,95	56,67	168,49	8,76	233,9
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	7,71	26,89	74,00	1,29	115,00	27,24	142,24	56,67	167,50	7,81	232,0
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	6,77	27,15	76,00	1,33	115,00	27,49	142,49	56,67	166,24	6,85	229,8
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	5,82	27,37	78,00	1,36	115,00	27,71	142,71	56,67	164,73	5,89	227,3
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	4,86	27,55	80,00	1,40	115,00	27,90	142,90	56,67	162,98	4,92	224,6
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	3,89	27,70	82,00	1,43	115,00	28,06	143,06	56,67	161,02	3,94	221,6
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	2,92	27,82	84,00	1,47	115,00	28,18	143,18	56,67	158,85	2,96	218,5
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	1,95	27,91	86,00	1,50	115,00	28,26	143,26	56,67	156,49	1,98	215,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	0,98	27,96	88,00	1,54	115,00	28,32	143,32	56,67	153,94	0,99	211,6
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	0,00	27,98	90,00	1,57	115,00	28,33	143,33	56,67	151,24	0,00	207,9
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-0,98	27,96	92,00	1,61	115,00	28,32	143,32	56,67	148,38	-0,99	204,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-1,95	27,91	94,00	1,64	115,00	28,26	143,26	56,67	145,38	-1,98	200,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-2,92	27,82	96,00	1,68	115,00	28,18	143,18	56,67	142,26	-2,96	196,0
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-3,89	27,70	98,00	1,71	115,00	28,06	143,06	56,67	139,03	-3,94	191,8
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-4,86	27,55	100,00	1,75	115,00	27,90	142,90	56,67	135,70	-4,92	187,4
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-5,82	27,37	102,00	1,78	115,00	27,71	142,71	56,67	132,27	-5,89	183,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-6,77	27,15	104,00	1,82	115,00	27,49	142,49	56,67	128,78	-6,85	178,6
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-7,71	26,89	106,00	1,85	115,00	27,24	142,24	56,67	125,21	-7,81	174,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-8,65	26,61	108,00	1,88	115,00	26,95	141,95	56,67	121,60	-8,76	169,5
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-9,57	26,29	110,00	1,92	115,00	26,62	141,62	56,67	117,93	-9,69	164,9
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-10,48	25,94	112,00	1,95	115,00	26,27	141,27	56,67	114,23	-10,61	160,3
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-11,38	25,56	114,00	1,99	115,00	25,88	140,88	56,67	110,50	-11,52	155,6
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-12,26	25,15	116,00	2,02	115,00	25,47	140,47	56,67	106,75	-12,42	151,0
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-13,13	24,70	118,00	2,06	115,00	25,02	140,02	56,67	102,99	-13,30	146,4
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-13,99	24,23	120,00	2,09	115,00	24,54	139,54	56,67	99,22	-14,17	141,7
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-14,83	23,73	122,00	2,13	115,00	24,03	139,03	56,67	95,45	-15,01	137,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-15,64	23,19	124,00	2,16	115,00	23,49	138,49	56,67	91,69	-15,84	132,5

g	n [/]	ω [rad/s]	r_g [m]	D [m]	R [m]	V_o^* [m/s]	V_o [m/s]	v_{x0}	v_{y0}	ϑ [°]	ϑ [rad]	Hrot [m]	Yg [m]	Hg [m]	L_G [m]	Gmax [m]	Xg [m]	G_{TOT} [m]
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-16,44	22,63	126,00	2,20	115,00	22,92	137,92	56,67	87,93	-16,65	127,9
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-17,22	22,05	128,00	2,23	115,00	22,33	137,33	56,67	84,20	-17,44	123,4
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-17,98	21,43	130,00	2,27	115,00	21,70	136,70	56,67	80,48	-18,21	118,9
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-18,72	20,79	132,00	2,30	115,00	21,06	136,06	56,67	76,79	-18,96	114,5
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-19,43	20,13	134,00	2,34	115,00	20,38	135,38	56,67	73,13	-19,68	110,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-20,13	19,43	136,00	2,37	115,00	19,68	134,68	56,67	69,49	-20,38	105,8
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-20,79	18,72	138,00	2,41	115,00	18,96	133,96	56,67	65,90	-21,06	101,5
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-21,43	17,98	140,00	2,44	115,00	18,21	133,21	56,67	62,33	-21,70	97,3
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-22,05	17,22	142,00	2,48	115,00	17,44	132,44	56,67	58,81	-22,33	93,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-22,63	16,44	144,00	2,51	115,00	16,65	131,65	56,67	55,32	-22,92	89,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-23,19	15,64	146,00	2,55	115,00	15,84	130,84	56,67	51,88	-23,49	85,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-23,73	14,83	148,00	2,58	115,00	15,01	130,01	56,67	48,47	-24,03	81,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-24,23	13,99	150,00	2,62	115,00	14,17	129,17	56,67	45,12	-24,54	77,2
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-24,70	13,13	152,00	2,65	115,00	13,30	128,30	56,67	41,80	-25,02	73,5
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-25,15	12,26	154,00	2,69	115,00	12,42	127,42	56,67	38,53	-25,47	69,7
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-25,56	11,38	156,00	2,72	115,00	11,52	126,52	56,67	35,31	-25,88	66,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-25,94	10,48	158,00	2,76	115,00	10,61	125,61	56,67	32,13	-26,27	62,5
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-26,29	9,57	160,00	2,79	115,00	9,69	124,69	56,67	28,99	-26,62	59,0
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-26,61	8,65	162,00	2,83	115,00	8,76	123,76	56,67	25,90	-26,95	55,6
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-26,89	7,71	164,00	2,86	115,00	7,81	122,81	56,67	22,86	-27,24	52,3
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-27,15	6,77	166,00	2,90	115,00	6,85	121,85	56,67	19,86	-27,49	49,0
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-27,37	5,82	168,00	2,93	115,00	5,89	120,89	56,67	16,90	-27,71	45,9
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-27,55	4,86	170,00	2,97	115,00	4,92	119,92	56,67	13,98	-27,90	42,7
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-27,70	3,89	172,00	3,00	115,00	3,94	118,94	56,67	11,11	-28,06	39,7
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-27,82	2,92	174,00	3,04	115,00	2,96	117,96	56,67	8,27	-28,18	36,8
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-27,91	1,95	176,00	3,07	115,00	1,98	116,98	56,67	5,48	-28,26	33,9
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-27,96	0,98	178,00	3,11	115,00	0,99	115,99	56,67	2,72	-28,32	31,1
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	27,98	31,43	-27,98	0,00	180,00	3,14	115,00	0,00	115,00	56,67	0,00	-28,33	28,3



Dati di input calcolo AEROGENERATORE di riferimento:

$D=170$ m

$H_{\text{mozzo}} = 115$ m

$L_{\text{pala}}=85$ m

Rpm = 10,6

Gittata max., totale=239,1 m.

6.5 FRAMMENTO DI PALA

L'evento della rottura di un frammento consistente di pala risulta meno frequente¹. Per le caratteristiche del materiale strutturale, tende ad essere una rottura progressiva. Pertanto, nella maggior parte dei casi si ha una prima flessione della struttura con conseguente inevitabile urto con la torre (posta sottovento nella quasi totalità delle WTG). La conseguente rottura dà luogo a traiettorie varie che non sono deterministicamente calcolabili.

Nella maggior parte dei casi di lancio di piccoli frammenti di pala la causa registrata è la concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica. Tale fenomeno è stato considerato dai costruttori che hanno iniziato a dotare gli aerogeneratori di un sistema di convogliamento della corrente di fulminazione costituito da recettori metallici posti lungo la 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 della pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala. È possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala.

Per avere un ordine di grandezza sulla distanza raggiunta dai frammenti di una pala eolica, si fa riferimento allo studio "Recommendations of Risk assessment of ice throw and Blade Failure in Ontario – Canadian Wind Energy Association – M.P. Leblanc – Garrad Hassan". Secondo tale studio, la probabilità che un frammento di pala staccatosi dalla turbina vada oltre i 50 m dalla torre è dell'ordine di 2×10^{-5} .

6.6 GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DI PALA

Volendo stabilire quale sia la gittata massima del frammento di pala, facendo riferimento al rischio accettato² in sede progettuale (pari a 10^{-6}) si raggiunge tale valore a meno di 190 m.

A 190 m la probabilità diminuisce ancora di un fattore 10 e, per eventi rari come quelli della rottura di una pala la probabilità diventa praticamente nulla.

¹ Analysis of Risk-Involved Incidents of Wind Turbine – version 1.1 Januar 2005 – ECN: per la rottura Rottura Pala riporta una probabilità di $8,4 \cdot 10^{-4}$ [1/y] mentre per il frammento $2,6 \cdot 10^{-4}$ [1/y].

² European Wind Turbine Standards II

7 CONCLUSIONI ROTTURA DEGLI ORGANO ROTANTI

Partendo dai dati degli aerogeneratori in merito alla velocità di rotazione fornita dal costruttore (rpm) sono stati eseguiti dei calcoli di gittata con la teoria della fisica del punto materiale. Il calcolo illustrato nei paragrafi precedenti porta ad un valore massimo di gittata pari a 239,1 m.

La gittata massima calcolata garantisce la distanza di sicurezza per tutte le 8 turbine sia rispetto alle viabilità Provinciali e Statali sia riguardo agli edifici censiti catastalmente come civili abitazioni presenti nell'area di parco. In particolare, si segnala l'assenza di edifici accatastati nel raggio di 300 m. (confronta layout 25 dell'elaborato grafico avente codice SGM-SA-D019 R0.

8 CLASSI DI INCIDENTI

Gli eventi negativi, che influiscono sulla realizzazione degli aerogeneratori, sono provocati specialmente e non unicamente da manifestazioni naturali. Anche azioni umane inconsulte ed imprevedute, pur se in misura meno preponderante di quelle scatenate dalla natura, possono entrare nel ventaglio delle cause di incidente. Tra esse vanno considerate quelle che derivano da errore umano. Questo contributo non si può mai escludere dal novero delle ragioni, che sono origine di fatti spiacevoli, dannosi per le cose e pericolosi per i lavoratori. Per la maggior estensione temporale, che comprende tutta la vita della centrale, e per la maggior combinazione di azioni, che influenzano il comportamento strutturale e funzionale della macchina, ci si deve riferire con maggior insistenza al periodo di funzionamento. Non è detto che eventi negativi non possano colpire le fasi, che precedono l'avvio e l'andata a potenza delle turbine eoliche. Anzi, alcuni di essi possono essere tipici di tali periodi tanto che sovente vengono classificati nel novero degli incidenti sul lavoro.

La drastica ricomposizione delle categorie incidentali è indispensabile non soltanto per un ordine espositivo quanto per rispondere alla esigenza di una rigorosa classificazione.

8.1 ROTTURA/DEFORMAZIONE DELLA TORRE E SUO SCALZAMENTO

La distruzione della pala o di suoi frammenti può concludersi in un moto regolare fino al piano campagna o può in taluni casi finire con l'interagire con altre porzioni della torre eolica. L'urto anelastico, che ne consegue, può:

- provocare una lesione locale accompagnata da deformazione della sezione con eventuale ripercussione sulla stabilità della navicella, che potrebbe essere catapultata a terra (rovesciamento di navicella);
- incidere più profondamente sino a produrre inflessione della torre, che è un corpo contraddistinto da una relativa snellezza, essendo molto sviluppato in altezza, e la cui parte superiore potrebbe essere abbattuta.

Mentre nel primo caso non è detto che la navicella venga proiettata al suolo, nel secondo caso l'effetto finale è senz'altro di questo tipo. L'insieme delle forze statiche e dinamiche (azione del vento, vibrazioni scaricate dai carichi a quote superiori, come navicella, rotore e pale, che sono fuori controllo, etc.) possono portare a rottura o crollo della torre. È una conseguenza assai probabile, per la quale non valgono le modifiche ai parametri progettuali a meno di pesanti incrementi nei pesi (per maggiori spessori, diverse sezioni, irrigidimenti, etc.) e nei costi.

Un caso di incidente ancora più radicale e più grave può essere quello in cui è documentata la distruzione dell'aerogeneratore a seguito del rovesciamento completo dell'insieme turbina-fondazione. È evidente che il vento, sempre che sia stato soltanto questa la condizione eccezionale di carico, abbia trovato una debole attività contrastante, cioè anti-ribaltante, nel blocco di fondazione. Questo è rimasto compatto ed unito, come almeno avrebbe dovuto per rispondere al carico eolico. L'azione risultante del vento si manifesta e può essere ridotta ad una forza lungo l'asse del rotore. Ne consegue un rilevante momento flettente (forza risultante per altezza della turbina) da riportare necessariamente sul basamento. Se non è stato dimensionato in modo insufficiente lo spessore, lo è stata la superficie. Il risultato evidente è che il corpo di fondazione non sia riuscito ad offrire una massa adeguata e sufficiente per opporsi al momento d'origine eolica, quando il vento raggiunga il valore eccezionale sviluppatosi. È proprio in questo frangente che la fondazione deve provvedere a difendere la turbina, tenendola costantemente nel suo assetto verticale e con il piede ben saldo. Il rischio, imputabile a presenza di "oggetti da difendere", dislocati casualmente od in modo permanente entro il raggio di caduta, e di persone, stazionanti o transistanti nell'area, sarebbe indubbiamente elevato, a motivo delle energie in gioco.

Il cedimento della struttura di sostegno della navicella o di parziale deformazione della stessa è il terzo fenomeno registrato in termini numerici dopo la rottura delle pale ed i casi di fuoco. Tuttavia, il riflesso economico e la dimensione del danno sono nettamente superiori a quelli riscontrabili con il distacco di una pala o di un frammento di esso.

Il rischio per la popolazione e per il personale appare essere nettamente inferiore, in quanto la eventuale caduta si risolve entro una distanza dal piede relativamente ridotta. Questo fenomeno sembra caratterizzare maggiormente le turbine con una età maggiore e pertanto con minore potenza.



8.2 EVENTI INCIDENTALI DA LANCIO DI GHIACCIO

La formazione di ghiaccioli, di croste, di lastre ghiacciate e di piccoli o meno piccoli ammassi nevosi sulle superfici delle pale, sono da far risalire all'azione di stagioni fredde in zone climatiche rigide e solitamente settentrionali per le nostre latitudini.

Pur se infrequente il fenomeno di clima molto rigido con temperature sottozero non è da escludere. Anzi si sono già avute stagioni invernali particolarmente fredde, pur se non molto durature, al Sud Italia. La formazione di ghiaccio lungo le pale non è da escludere e nemmeno sono da ignorare cadute o lanci di ghiaccio da aerogeneratori. Le distanze, percorse in volo, dal corpo estraneo dipendono da svariati fattori, quali dimensioni, conformazione e consistenza della massa ghiacciata, forza centrifuga raggiunta dalle pale e di conseguenza trasmessa alla formazione di ghiaccio, altezza della torre, punto dell'area spazzata dal rotore in cui la massa lascia la pala, etc. Anche le caratteristiche (presenza di "oggetti" da preservare, frequentazione umana, declivi/accidentalità del suolo, etc.) del sito circostante la turbina, che sta producendo questo tipo di "missili", gioca un ruolo essenziale sul rischio di lesioni. Occorre considerarlo attentamente per discernere l'aggressività di tali cadute o dei conseguenti lanci sull'ambiente e, soprattutto, sull'uomo e sulle sue cose (costruzioni, auto, impianti vari, etc.). Tuttavia, per quanto concerne il parco eolico di Castronovo, si ritiene non vi siano le condizioni metereologiche tali, durante il corso dell'anno, da tenere in considerazione la possibilità che fenomeni come quello descritto si verificino. In tal senso il rischio potrà essere considerato o minimo o del tutto assente.

8.3 EVENTI INCIDENTALI DI VARIA NATURA

La categoria, nota con il termine inglese di "miscellaneous", è stata introdotta nello schema di banca dati del CWIF per dare una diversa e più coerente classificazione degli eventi iniziatori. Le rotture o le fermate provocate in componenti dell'aerogeneratore trovano accoglimento in questa sede, se non producono evidenti conseguenze strutturali che hanno già loro collocazione altrove. Tra gli altri eventi si annoverano le risultanze da mancata manutenzione, da disfunzioni elettriche per sovracorrenti, purché non si concludano in fuochi o elettrocuzioni (termine derivante dall'inglese "electrolocution" che denota la morte per elettro-shock), da incidenti durante le fasi di costruzione o di trasporto, da caduta di fulmini purché non sia seguita da danni alla turbina con rottura di pala o incendio.

8.4 FULMINAZIONI E FUOCO

La seconda categoria tra le due, che sono state evidenziate, è più insidiosa. Pur prendendo tutti i provvedimenti in grado di attenuare gli effetti dal momento che non si può agire sulle

cause, se queste hanno origine da fenomeni meteo, cioè dalla natura, la gravità delle azioni deve essere analizzata e studiata. Difficilmente si potranno neutralizzare le azioni, si dovranno studiare soluzioni di contenimento, cioè predisporre tutto ciò che non consenta di pervenire a conseguenze catastrofiche. Un caso evidente di preoccupazioni è da assegnare alla caduta di un fulmine sulla turbina eolica. È una causa comune di rottura (ad es., sulla pala) o di incendio per la presenza di sostanze infiammabili (materiale strutturale delle pale, olio per il raffreddamento, vapori combustibili, etc.), che sono presenti nelle realizzazioni eoliche.

Non essendo possibile provvedere se non raramente ad estinguere il fuoco laddove si è sviluppato ed è concentrato, si lascia bruciare completamente ciò che è stato attaccato dalle fiamme. L'operato delle Autorità locali (vigili del fuoco, polizia, etc.) si limita a circoscrivere la zona per il periodo di tempo, in cui i pericoli per la popolazione siano evidenti, e per lo spazio, la cui estensione sia determinata da reali manifestazioni dannose per cose o persone (lancio di pezzi, crolli, etc.).

A tal proposito la navicella è dotata di un sistema antincendio, che consiste di rilevatori di fumo e CO₂, i quali rivelano gli incendi e attivano un sistema di spegnimento ad acqua atomizzata ad alta pressione nel caso di incendi dei componenti meccanici e a gas inerte (azoto) nel caso di incendi dei componenti elettrici (cabine elettriche e trasformatore).

In aggiunta a ciò, il rivestimento della navicella contiene materiali autoestinguenti. L'aerogeneratore è dotato inoltre di un completo sistema antifulmine, in grado di proteggere da danni diretti ed indiretti sia la struttura (interna ed esterna) che le persone. Il fulmine viene "catturato" per mezzo di un sistema di conduttori integrati nelle pale del rotore, disposti ogni 5 metri per tutta la lunghezza della pala. Da questi, la corrente del fulmine è incanalata attraverso un sistema di conduttori a bassa impedenza fino al sistema di messa a terra. La corrente di un eventuale fulmine è scaricata dal rotore e dalla navicella alla torre tramite collettori ad anelli e scaricatori di sovratensioni. La corrente del fulmine è infine scaricata a terra tramite un dispersore di terra. I dispositivi antifulmine previsti sono conformi agli standard della più elevata classe di protezione (Classe I), secondo lo standard internazionale IEC 61024-1.

8.5 INCIDENTI CON L'INFLUENZA SULL'AMBIENTE

Alla voce collisioni è doveroso subito citare il contatto con corpi aerei, ed in modo particolare con corpi volanti in grado, a certe altezze, di impattare sull'aerogeneratore. L'altezza massima, cui arriva la punta della turbina eolica di progetto, è pari a 200 m (119 m altezza del mozzo e 81 m lunghezza pala e navicella). Sbattere contro questo ostacolo per altro mobile e sottile dovrebbe essere occasione aberrante o particolarmente sfortunata in una vita razionalmente normale. La turbina è equipaggiata, in accordo alle disposizioni dell'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile), con un sistema di segnalazione notturna

per la segnalazione aerea. La segnalazione notturna consiste nell'utilizzo di una luce rossa da installare sull'estradosso della navicella dell'aerogeneratore. Le turbine di inizio e fine tratto avranno una segnalazione diurna consistente nella verniciatura della parte estrema della pala con tre bande di colore rosso ciascuna di 6 m per un totale di 18 m.

8.6 INCIDENTI PER PRESENZA FISICA DELL'AEROGENERATORE

Quanto citato nel paragrafo 4.5 potrebbe essere applicato anche per incidenti che non sono creati direttamente dalle turbine eoliche. Queste possono infatti essere causa indiretta di incidenti nei riguardi dei veicoli stradali, in quanto la sensibilità da parte dei guidatori alla loro vista li distrae, spostando altrove l'attenzione da quanto o da come stanno guidando. La conclusione può essere un fuori strada od una qualche altra variante dell'incidente stradale.

8.7 DANNI PER L'AVIFAUNA

L'interazione con la avifauna stanziale o di passo è uno degli aspetti, che in molte riunioni di ecologisti compare come un elemento di più vivace discussione ed è pure un argomento che i concessionari di campi eolici tengono sotto controllo ed esaminano anche con campagne ad hoc. In realtà, è uno dei temi più controversi per gli impianti eolici, quando soprattutto siano localizzati in zone ad elevata vocazione naturalistica o nei loro pressi.

Tali zone possono essere rilevanti, o per specie locali, o per specie migratorie, che vi soggiornino per certi periodi dell'anno, o che semplicemente vi transitino. Ci si riferisce a specie che, o sono stanziali localmente (costituite da uccelli terrestri o marini), o sono da ritenere protette (se non in via di temuta estinzione), o trovino rifugio stagionale proprio nell'area del parco eolico, o vedano il parco inserito nelle loro rotte migratorie. Indipendentemente dalla criticità o meno delle interazioni con l'avifauna, è opportuno sviluppare qualche considerazione per impostare la problematica degli eventuali rischi, cui possono essere soggetti i volatili a causa della installazione di turbine eoliche, e per informare circa le azioni che consentano di inserire campi eolici in aree protette, soggette ai regimi di parchi naturali. Con macchine delle dimensioni attuali il crescere della taglia porterebbe a velocità decrescenti, che, oltre ad una migliore visibilità dell'ostacolo da parte del volatile, indurrebbe minori decessi.

Valutazioni statistiche, esperite dal Ministero dell'Ambiente olandese, porterebbe a far annoverare il numero di morti corrispondenti ad un sito di 1000 MW in confronto con altre attività umane in grado di produrre effetti altrettanto negativi sulla vita dei volatili. Ciò porta alla seguente analisi:

- 1500 volatili morti per effetto delle azioni di caccia;

- 1000 volatili morti per effetto della presenza di tralicci elettrici;
- 2000 elementi deceduti per effetto della presenza di traffico di vario genere e tipo;
- 20 a causa dell'intervento di rotor eolici.

Dai numeri provenienti da tali studi si può evidenziare come la fonte eolica concorrerebbe solamente in minima parte all'impatto sull'avifauna, che essa subisce per una serie di attività umane, legate, o al proprio piacere o alle necessità vitali.

In conclusione, dalla letteratura consultata, si può affermare che gli impianti eolici rappresentano per l'avifauna un rischio contenuto, essendo stati riscontrati valori di mortalità inferiori a quelli derivanti da collisioni con altri manufatti quali strade, linee elettriche, torri per telecomunicazioni. Nel complesso, l'avifauna mostra un buon adattamento alle mutate condizioni ambientali, adottando strategie di volo che permettano di evitare gli ostacoli. Nel corso del tempo, nelle aree dove sono presenti aerogeneratori, si registra una sensibile riduzione delle collisioni (già di per sé su valori molto bassi).

8.8 DANNI CONSEGUENTI AD OGGETTI ESTERNI

Per trattare l'argomento bisogna innanzitutto definire quali siano i criteri, che informano tale indagine. I danni possono coinvolgere la popolazione, l'ambiente o l'integrità dell'impianto eolico stesso, nel cui ambito territoriale si dovrebbero sviluppare gli incidenti. Una discussione di questo tipo è importante per determinare il concetto di rischio conseguente. È noto che il rischio sia la combinazione della intensità della rottura o dell'evento incidentale con l'entità dei danni provocati. Il passo successivo è circoscrivere con precisione l'ambito nel quale i danni siano provocati e possano essere valutati. Diverse sono le caratteristiche degli effetti, se gli "oggetti" da difendere e da conservare sono anch'essi differenti. Incidente ed effetti, marcano di pari passo, in quanto tramite la loro valutazione è possibile risalire alla rilevanza ed alla portata del rischio. Successivamente occorre riflettere ed indagare quali siano le ripercussioni, che gradualmente ed a seconda dell'entità dell'incidente possono ricadere sull'esterno dell'impianto, sull'ambiente e, infine, sulla popolazione. Sfortunatamente nelle centrali eoliche (facendo astrazione per la grande categoria delle anomalie, che potrebbero essere ritenute o siano configurabili come malfunzionamenti più o meno tenuti sotto controllo dai sistemi di regolazione, di allarme e di controreazione dell'impianto) la classe delle rotture o, meglio, delle cause, che intaccano l'integrità di parti strutturali o funzionali dell'aerogeneratore, ha immediati riflessi sull'esterno della macchina.

Sono certamente da preservare da azioni d'impatto almeno i corpi convoglianti o contenenti fluidi a diversa pericolosità (tubazioni/cisterne, gasdotti, oleodotti, etc.) sistemati in superficie o con ridotto interrimento; le stazioni di distribuzione di combustibili (benzine, gas più o meno liquefatti, gas compressi, etc.); le vie di comunicazione (strade comunali/provinciali con esclusione di autostrade o delle vie di grandissimo traffico, che non dovrebbero trovarsi nelle immediate vicinanze del sito eolico), le ferrovie (ad uno o più binari); le dighe o gli

sbarramenti (a piccola elevazione, di vari materiali specialmente se in terra, regolazione della portata di corsi d'acqua, etc.); le abitazioni e gli insediamenti civili.

Stando così le cose, un provvedimento ineludibile diviene la distanza dell'oggetto da difendere, che deve avere rispetto all'impianto eolico. Come capita spesso con le ripercussioni delle analisi di sicurezza il provvedimento primario è da collegare con la distanza, cui è posto o può essere sistemato l'oggetto da proteggere. Se esso preesiste, la relazione spaziale tra campo eolico ed oggetto si trasferisce sulla collocazione del campo eolico. È su quest'ultimo, che si devono affrontare e prendere le decisioni opportune per ovviare o per ridurre le conseguenze di eventuali incidenti, sorti nel suo ambito.

8.9 INCIDENTI MECCANICI

La classe degli eventi a natura meccanica è indubbiamente piuttosto affollata. Non tanto per la tendenza al cedimento, che possa essere insita nelle parti meccaniche o ne costituisca una estremizzazione, quanto piuttosto per la sensibilità che qualunque osservatore, presente su un sito eolico, ha verso corpi in movimento o in rotazione, come appunto sono le pale dell'aerogeneratore.

Non trattandosi di componenti statici, qualunque persona anche non dotata di specifiche cognizioni tecniche, che per motivi personali, o di lavoro, o di diporto si trovi a passare od a stazionare a distanze relativamente piccole da un aerogeneratore è disposto a dubitare.

I principali possono essere classificati come segue:

- separazione della pala dal rotore e/o rottura della stessa;
- deformazione di pala non separatasi dal mozzo;
- rottura e caduta di navicella e di torre;
- rovesciamento o abbattimento di turbina;
- lancio di ghiaccio, depositatosi sulle pale;
- collisioni con corpi estranei

8.10 ROTTURA DELLA PALA

Le modalità di rottura della pala possono essere assai diverse. Essendo un organo in rotazione è soggetto alla forza centripeta che va equilibrata con l'azione della struttura della torre stessa. Per minimizzare tale forza, la pala è costruita in materiale leggero; normalmente si utilizzano materiali compositi che sfruttano le caratteristiche meccaniche così da far fronte ai carichi aerodinamici imposti.

Le modalità di rottura sono classificabili in due gruppi:

- 1) Rottura della pala alla radice.
- 2) Rottura di frammento.
-

8.10.1 Rottura della pala alla radice

La rottura della pala alla radice è un evento che storicamente è risultato frequente (rispetto al numero di rotture totali) in quanto la sezione di attacco risulta assai “critica” dal punto di vista strutturale.

Le cause sono sostanzialmente due:

1) la discontinuità della struttura che passa da un carico distribuito sulle fibre alla flangia di attacco crea inevitabili concentrazioni tensionali che con l'andar del tempo può creare problemi di affaticamento con conseguente rottura. C'è da dire che i costruttori hanno ben chiaro il problema e che negli ultimi anni si sono introdotti diversi accorgimenti che hanno migliorato di molto le prestazioni.

2) la rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo. Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni serrati opportunamente durante l'installazione della turbina.

Il precarico conferito ai bulloni durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei bulloni 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 manifesta a causa di non corretti interventi di manutenzione programmata cui l'aerogeneratore va sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore. Per cui l'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono aver determinato la rottura per fatica dei bulloni ed al distacco della pala.

Per la stima della gittata massima dell'intera pala si impongono alcune ipotesi semplificative:

- 1) distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;
- 2) baricentro posizionato ad $1/3$ della lunghezza della pala;
- 3) assenza di attriti viscosi durante il volo: questa ipotesi risulta conservativa considerando che in letteratura si registra, a causa degli effetti di attrito, una diminuzione del tempo di volo anche del 20%;
- 4) distacco in corrispondenza di un angolo di 315° rispetto alla verticale, che dal punto di vista teorico garantisce la massima gittata (moto in senso orario);
- 5) distacco alla rotazione di funzionamento massima;
- 6) vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
- 7) assenza di effetti di “portanza” del profilo alare.

Un esempio classico è la rottura di una pala per ragioni interne all'aerogeneratore. Il mancato o difettoso intervento del controllo di velocità, le rotture sul sistema di freno o sul moltiplicatore possono essere una causa comune di tale situazione. Il meccanismo di freno è previsto, sia per arrestare il rotore, sia per tenerlo fermo, quando il vento soffia ad una velocità eccessiva (20/25 m/s) tale per cui la macchina deve essere tenuta f.s. per ragioni di sicurezza. Il sistema ad ingranaggi (gearbox) serve per moltiplicare i giri dell'albero lento in entrata in modo che l'albero veloce in uscita dall'apparecchio consenta al generatore elettrico

di produrre l'elettricità attesa. Se entrambi dovessero andare in avaria, si direbbe che la macchina “vada in fuga”. Il rotore tende ad accelerare il suo regime di rotazione e raggiunge parecchie volte il suo valore a funzionamento normale. In questo modo si creano dei carichi sulle pale in notevole eccesso rispetto a quelli di progetto. Le porzioni della pala che prima possono essere divelte, sono le parti estreme. Possono essere strappate dal resto e lanciate con una quantità di moto assai alta.



Fig. 5 Montaggio Pala

8.10.2 Frammento di pala

L'evento della rottura di un frammento consistente di pala risulta meno frequente³. Per le caratteristiche del materiale strutturale, tende ad essere una rottura progressiva. Pertanto, nella maggior parte dei casi si ha una prima flessione della struttura con conseguente inevitabile urto con la torre (posta sottovento nella quasi totalità delle WTG). La conseguente rottura dà luogo a traiettorie varie che non sono deterministicamente calcolabili.

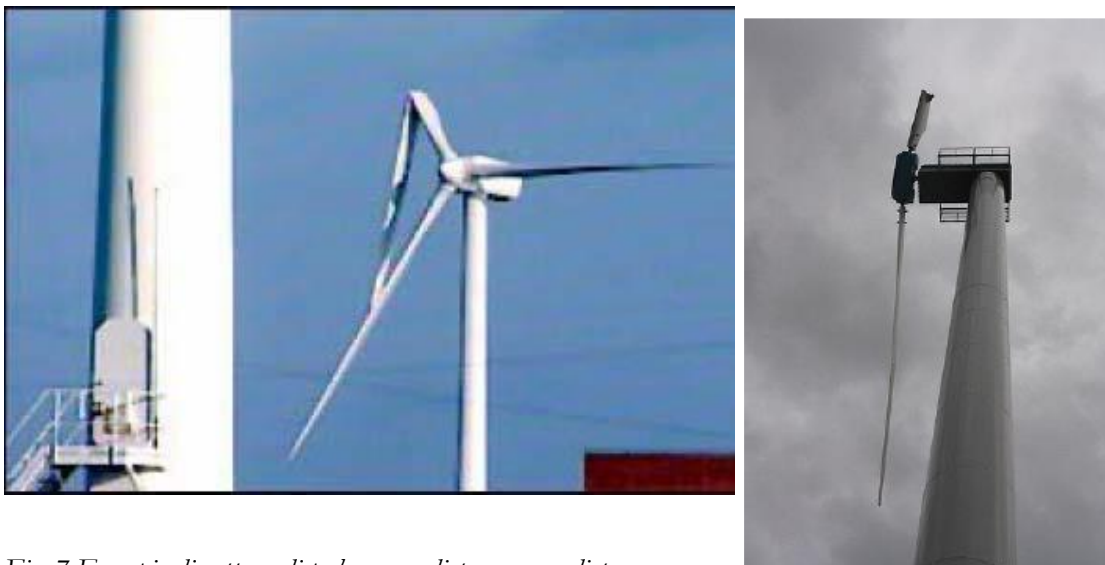


Fig. 7 Esempio di rottura di pala senza distacco e con distacco

Nella maggior parte dei casi di lancio di piccoli frammenti di pala la causa registrata è la

³ Analysis of Risk-Involved Incidents of Wind Turbine – version 1.1 Januar 2005 – ECN; per la rottura Rottura Pala riporta una probabilità di $8,4 \cdot 10^{-4}$ [1/y] mentre per il frammento $2,6 \cdot 10^{-4}$ [1/y].

concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica. Tale fenomeno è stato considerato dai costruttori che hanno iniziato a dotare gli aerogeneratori di un sistema di convogliamento della corrente di fulminazione costituito da recettori metallici posti lungo la pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra (riferimento paragrafo 4.4 della presente relazione). 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 della pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala. È possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala. Per avere un ordine di grandezza sulla distanza raggiunta dai frammenti di una pala eolica, si fa riferimento allo studio “Recommendations of Risk assessment of ice throw and Blade Failure in Ontario – Canadian Wind Energy Association – M.P. Leblanc – Garrad Hassan”. Secondo tale studio, la probabilità che un frammento staccatosi di pala staccatosi dalla turbina vada oltre i 50 m dalla torre è dell'ordine di $2 \cdot 10^{-5}$.

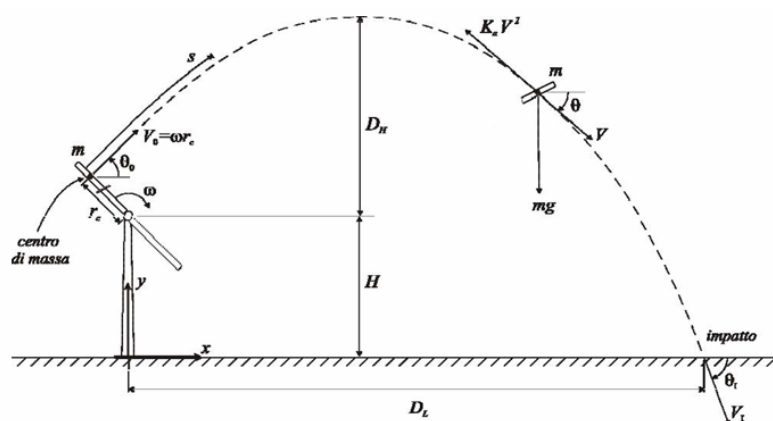


Fig.8 Traiettoria della pala

Per avere una stima dei numeri, che descrivono l'importanza di ogni caso di incidenti, è opportuno ancora dedurre il quantitativo incidentale che è proprio di queste categorie di eventi meccanici con rotture di pala e che in un ideale elenco di frequenza incidentale occupa il primo posto. Nella realizzazione di questa serie di incidenti non si scevera tra le possibili cause e neppure sull'entità della rottura, in quanto può essere più significativo disporre di un dato che copra tutte le casistiche.

8.11 GITTATA DI UN CORPO ROTANTE

L'analisi per la combinazione dei carichi, per i materiali usati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura si fa riferimento alla norma CEI EN61400-1.

L'analisi è stata condotta per i seguenti casi:

- una pala eolica che si stacca;
- un pezzo di ghiaccio che potrebbe crearsi in inverno e che parte dall'estremità di una pala.

In qualsiasi caso, la gittata massima e la velocità all'impatto sono dei fattori determinanti per la stima del rischio.

La gittata massima dipende dal prodotto "raggio della pala x velocità di rotazione".

Il calcolo presenta comunque alcune complessità in quanto le variabili in gioco sono numerose ed il risultato può essere soltanto di tipo probabilistico in quanto legato alle modalità ed al momento del distacco. Infatti, un corpo lanciato in aria in presenza di forte vento potrebbe dar luogo ad effetti di "portanza" che possono prolungare i tempi di volo. L'effetto viscoso dell'aria, d'altra parte, ha un effetto opposto frenando il corpo durante il moto. Considerando, quindi, la natura della pala, avente un profilo aerodinamico, lo studio del moto risulta complesso, a causa di tutte le forze e dei momenti che nascono al momento del distacco e nell'interazione col vento. È da sottolineare comunque che nell'ultimo decennio, il tasso d'incidentalità è ancora diminuito a seguito dell'evoluzione tecnologica e del miglioramento delle macchine eoliche, malgrado l'aumento medio delle loro dimensioni.

Uno studio danese ha condotto su 18 mesi, tra il 1998 e i 1999, un'analisi riguardante le pale, le navicelle e le torri di 2.130 rotori, per una produzione complessiva di 540 MW. Su 3.195 anni cumulati di funzionamento, solo 7 incidenti hanno comportato la distruzione delle pale. Il tasso è dunque di un incidente ogni 457 anni-macchina. Si noti che la Danimarca presenta maggiori rischi di guasti e di sospensione della produzione a causa della presenza di brina e di ghiaccio.

Un altro studio danese a partire da dati registrati su 120 mesi tra il 1993 e il 2003 in un parco di 1.912 impianti mostra una probabilità di distruzione di 0,00083 impianti per anno. In ambito rurale, la correlazione di questa statistica (6×10^{-5} /anno) con la probabilità di occupazione di un m² di terreno da parte di una persona individua una probabilità globale di ferire qualcuno molto bassa.

9 PROBABILITA' DI ACCADIMENTO

L'aerogeneratore, al pari di tutte le realizzazioni industriali e tecniche, pone all'attenzione dei responsabili una serie di danni potenziali. Per limitarli devono essere formulati criteri, che sarebbe meglio se fossero derivati da prescrizioni o da statuizioni pubbliche e da normative. Ad essi si dovrebbero attenere costruttori e gestori di campi eolici.

Lo scopo sarebbe quello di ridurre i danni, derivanti da tali installazioni, sino ad un rischio residuale tecnico non eliminabile od accettabile. Nelle considerazioni entrerebbero sostanzialmente se non esclusivamente i requisiti di sicurezza, che l'impianto deve assicurare in tutte le fasi della propria vita (cioè, realizzazione, esercizio e dismissione oltre alla impostazione). È ovvio che in questo momento sono le prime due a farla da padrone. In mancanza di siffatte prescrizioni è prassi riferirsi ad una probabilità di rottura di 1006 eventi all'anno. Il dato numerico va inteso come un limite di soglia da raggiungere o da applicare. È stato per molto tempo il valore di accettabilità o di credibilità incidentale degli impianti nucleari, che prima di tutti e più di tutti hanno fatto della sicurezza il paradigma essenziale della loro esistenza nel panorama industriale dei nostri paesi. È naturale che se in un dato periodo di tempo, che è solitamente tagliato sull'anno, non si devono riconoscere eventi incidentali di quel tipo, che si sta considerando, la relativa probabilità di rottura assumerà il valore limite, che si è appena indicato, cioè 1006 eventi/anno. È ovvio che il valore del danno statistico della rottura di una torre per un convertitore eolico abbia singolarmente una probabilità maggiore. Essendo il processo di rottura della torre il risultato di una catena di eventi, la probabilità totale spettante a tale evento sarà la combinazione delle probabilità dei meccanismi intermedi, attraverso i quali si perviene al risultato. Ogni evento individuale della catena è visto con le sue conseguenze in modo che il prodotto della probabilità di occasione di ogni individuale evento fornisce la relativa probabilità di danno. Questo valore può essere messo in relazione con il valore di soglia, che dipende dall'oggetto individuale da proteggere. La relazione, che traduce il concetto ora esposto, si basa sulla seguente disuguaglianza.

$$P_{so} > P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4$$

nella quale per le singole quantità valgono le indicazioni precedenti e precisamente:

- P_{so} è il valore di soglia, che è relativo all'oggetto da difendere e che in linea generale potrebbe essere corrispondente al dato, già discusso in precedenza e cioè pari a 1006 o ben maggiore;
- P_1 è la probabilità di occasione dell'evento incidentale accaduto alla turbina eolica;
- P_2 è la probabilità di occasione dell'urto tra l'oggetto da proteggere e la pala;
- P_3 è la probabilità di occasione della condizione di vento sfavorevole o dei

condizionamenti ambientali;

- P4 la probabilità di occasione relativa ad altre cause, come tolleranze di costruzione, etc.

A tal proposito si riporta una tabella con alcuni casi registrati da letteratura, con danni in prevalenza di natura meccanica.

Sito	Data	Evento
<i>Kaiser-Wilhelm-Koog (Schleswig-Holstein, De)</i>	04.04.1997	rottura pala
<i>Rebgeshain, Vogelsbergkreis (Hessen, De)</i>	16.01.1999	caduta torre
<i>Helpershain, Vogelsbergkreis (Hessen, De)</i>	01.03.1999	caduta torre
<i>Lichtenau Asseln, Paderbron (Westphalia, De)</i>	12.12.1999	caduta torre
<i>Lichtenau Kreis, Paderbron (Westphalia, De)</i>	20.01.2000	rovesciamento di torre
<i>Jutland (Dk)</i>	29.01.2000	caduta di tre torri
<i>Wittmund, Harlingerland (De)</i>	10.02.2000	caduta torre
<i>Wehe den Hoorn bei Groningen (Nl)</i>	15.02.2000	caduta torre
<i>Wieringerwaard-Kolhorn (West Friesland, Nl)</i>	11.03.2000	caduta torre
<i>Husum, Schleswig-Holstein (De)</i>	28.11.2000	caduta torre
<i>Burgos (Merindales, Sp)</i>	09.12.2000	rottura torre
<i>Colorado (USA)</i>	15.05.'02	rottura pala
<i>Ulrichstein-Helpershain (De)</i>	09.09.'02	caduta rotore completo
<i>Goldenstedt Ellenstedt (De)</i>	28.10.'02	rovesciamento torre
<i>Wachusett Wind Site, Princeton, (Massachusetts, USA)</i>	19.11.'02	caduta torre anemometrica
<i>Reinsberg im Kreis Freiberg (Sassonia, De)</i>	05.04.'03	rottura torre
<i>Köstorf im Kreis Lüneburg (Bassa Sassonia, De)</i>	14.07.'03	fulminaz., perdita/deformazione pala
<i>Borkum Offshore Wind Park (Nl)</i>	21.12.'03	perdita pale
<i>Portel, Boulogne sur Mer (Fr)</i>	01.01.'04	rottura pala e torre
<i>Lankern bei Dingden (Westfalia, De)</i>	26.02.'04	lancio ghiaccio
<i>Loon plage, Port de Dunkerque (Fr)</i>	20.03.'04	rottura pala e torre
<i>Carzig im Kreis Märkisch Oderland (Brandenburgo, De)</i>	14.11.'04	lancio ghiaccio
<i>Rhede, Kreis Borken (Westphalia, De)</i>	12.12.'04	lancio ghiaccio
<i>Bölling bei Dahl, Stadtgebiet (Westphalia, De)</i>	30.01.'05	lancio ghiaccio
<i>Schlüchtern-Hohenzell im Main-Kinzig-Kreis (Hessen, De)</i>	01.02.'05	lancio ghiaccio
<i>Crystal Rig, (Scozia)</i>	07.04.'05	rottura pala
<i>Weatherford (Oklahoma, USA)</i>	06.05.'05	rottura di torre
<i>St. Thegonnec, Pleyber Christ (Finistère, Bretagna, Fr)</i>	06.10.'06	rottura pala
	28.6 e 8.7.'04	id.
<i>Lamkem bei Dingen (Westphalia, De)</i>	17.12.'05	lancio ghiaccio
<i>Filsumer Wind Park a Filsum bei Leer im</i>	10.01.'06	lancio ghiaccio

Sito	Data	Evento
Cold Northcott Windfarm, Bondmin Moor (Cornovaglia, UK)	13.01.'06	rottura pala
Wachusett Wind Site, Princeton, Massachusetts (USA)	21.02.'06	perdita pale e torre
Oldside, Workington (Cumbria, UK)	02.07.'06	rottura di pala
Lago Wilson (stato di Minnesota, USA)	01.09.'06(?)	rottura pala
Scroby Sands (Norfolk, UK)	06.10.'06	asportazione di punta da pala per urto con jack-up
Bondues (Lille, Francia)	04.12.'06	rovesciamento di torre
Schauenberg-Martinhagen im Landkreis Kasse (Bassa Sassonia, DE)	26.12.'06	lancio ghiaccio
Iwaya Wind Farm (distretto di Higashiodori, Ja)	11.01.'07	rottura torre
Windpark Raden in Besdorf im Kreis Steinburg (Schleswig-Holstein, De)	13.01.'07	caduta torre
Fenner, Contea di Madison (stato di New York)	28.01.'07	rottura pala
Parc Cynog a Llanmiloe (Carmarthen, Galles)	25.02.'07	causa dubbia, danni ad una pala
Fairfield nella Contea di Herkimer (stato di New York)	08.03.'07	cedimento di due torri anemometriche
Allaghany Ridge Wind Farm, Contea di Cambria (Pennsylvania, USA)	31.03.'07	cricche in pala
Voe (Shetland, Scozia)	11.05.'07	caduta di torre anemometrica
Cham de Chamlonge, Saint Etienne de Lugdaries (Ardèche, Fr)	15.06.'07	rottura di una pala
Uelvestüll bei Husum a Landkreis Nordfriesland (Schleswig-Holstein, De)	30.07.'07	perduta una pala
Klondike III presso la città di Wasco, Contea rurale di Sherman (stato dell'Oregon, USA)	26.08.'07	rottura torre
Argyll, Beinn an Tuirc (Scozia)	08.11.'07	rottura torre
Fenner, Contea di Madison (stato di New York)	15.11.'07	rottura pala per insufficiente serraggio pala-mozzo
Hersket Newmarket (Cumbria, UK)	30.12.'07	cedimento torre
Alkmaar (NL)	15.05.'08	rottura pala
Cohocton (stato di New York)	27.01.'08	rottura pala
Prince Wind Energy Project, Sault St. Marie (Ontario, Canada)	30.01.'08	perdita di una pala
Isola di Texel (Olanda settentrionale, NL)	07.02.'08	caduta torre
Hyacintvej, Hornslet (Jutland orientale, Dk)	22.02.'08	esplosione turbina
Regioni di Tokai e Kanto (Ja)	09.04.'08	rottura di una pala in due turbine
Searsburg VT (stato del Vermont, USA)	15.09.'08	rottura di torre

Tab.1 casi registrati da letteratura, con danni in prevalenza di natura meccanica.

In conclusione, in relazione al rischio di rottura, si riportano le risultanze del documento “*Analysis Of Risk Involved Incidents Of Wind Turbines?*”, allegato alla “*Guide for Risk-Based Zoning of Wind Turbines?*”, elaborato nel 2005 dall’ ECN (Energy Research Centre of the Netherlands) sulla base dei dati relativi a produzione di energia eolica, incidenti e manutenzione raccolti dallo ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik) in Germania e dall’ EMD (Energie- og Miljødata) in Danimarca. L’ECN ha analizzato le informazioni di incidenti registrate su un campione molto largo di turbine eoliche in Danimarca e Germania, determinando le frequenze di:

- rottura di una pala;
- rottura della punta e di piccole parti;
- rottura della torre alla base;
- caduta del rotore o della navicella
- caduta di piccole parti dal rotore o dalla navicella.

La probabilità di rottura della pala è stata suddivisa in diverse condizioni d’uso:

- alla velocità nominale;
- durante la frenata meccanica;
- in condizione di overspeed.

I risultati dell’analisi (riportati nella seguente figura) mostrano come la probabilità di rottura di una pala (0.84‰) sia inferiore al dato (2,6‰) utilizzato più frequentemente in studi di questo genere. Per quanto riguarda la probabilità di rottura in overspeed, è stata utilizzata la stima di studi precedenti, determinata moltiplicando la probabilità di guasto della rete elettrica (5 volta

in un anno) con la probabilità di rottura del primo sistema di frenata (10⁻³ per intervento) e del secondo sistema di frenata (10⁻³ per intervento) e per la probabilità di rottura della pala in queste condizioni (100%).

Part	Failure frequency per turbine per year			Maximum throw distance [m] (reported and confirmed)
	Expected Value	95% upper limit	Recommended Risk Analysis Value [1/yr]	
Entire blade	6.3*10 ⁻⁴	8.4*10 ⁻⁴	8.4*10 ⁻⁴	150
Nominal rpm			4.2*10 ⁻⁴	
Mechanical braking			4.2*10 ⁻⁴	
Overspeed			5.0*10 ⁻⁶	
Tip or piece of blade	1.2*10 ⁻⁴	2.6*10 ⁻⁴	2.6*10 ⁻⁴	500
Tower	5.8*10 ⁻⁵	1.3*10 ⁻⁴	1.3*10 ⁻⁴	Shaft height + half diameter
Nacelle and/or rotor	2.0*10 ⁻⁴	3.2*10 ⁻⁴	3.2*10 ⁻⁴	Half diameter
Small parts from nacelle	1.2*10 ⁻³	1.7*10 ⁻³	1.7*10 ⁻³	Half diameter

Half diameter

Tab.2 Frequenza di rottura e m

10 SCHEDA TECNICA DELL'AEROGENERATORE SG170

SG 6.2-170 IEC IIIA Technical Data

Rotor	
Diameter	170m
Swept area	22698 m ²
Speed range (min/nom/max)	4,86 / 8,83 / 10,60rpm
Power regulation	Variable speed
Rotor tilt	6 degrees
Hub coning	4 degrees
Hub	
Hub	Nodular cast iron
Main bearings	Tapered Roller bearings
Main shaft	Nodular cast iron
Nacelle bed frame	Nodular cast iron
Blade	
Type	Glass fiber and pultruded carbon caps
Blade length	83,5m
Max chord	4,5m
Blade root diameter	3,4m
Pre-bending	2,6m
Aerodynamic profile	SGRE
Weight	24t

