

- biogas ●
- biometano ●
- eolico ●
- fotovoltaico ●
- efficienza energetica ●
- waste to chemical ●

Relazione sulla gittata degli elementi rotanti

Progetto definitivo

Impianto eolico di "Castellana Sicula"

Comuni di Castellana Sicula e Polizzi Generosa (PA)

Località "Cozzo Bagianello"



N. REV. DESCRIZIONE

a Emissione

ELABORATO

Serdea srl

CONTROLLATO

Asja
Castellana Polizzi srl

APPROVATO

Serdea srl

IT/EOL/E-CASI/PDF/I/RT/036-a

15/11/2022

Via Ivrea, 70 - Rivoli (TO) Italia

T +39 011.9579211

F +39 011.9579241

info@asja.energy

INDICE

	PAGINA
1. PREMESSA	3
2. DATI STATISTICI	4
2.1 Rottura della pala.....	5
2.2 Report Vestas	5
3. CARATTERISTICHE DELLA PALA.....	7
4. CALCOLO DELLA GITTATA DELLA PALA O DI UN FRAMMENTO	8
5. CONCLUSIONI.....	18

Allegato 1: Vestas technical report “Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento”

1. PREMESSA

La Società *Asja Castellana Polizzi s.r.l.*, con sede legale a Torino in Corso Vittorio Emanuele II n. 6, intende realizzare un impianto per la produzione di energia elettrica da fonte eolica, composto da n. 7 aerogeneratori con potenza unitaria di 7,0 MW per una potenza complessiva di 49,0 MW ricadente nei territori comunali di Castellana Sicula (PA) e Polizzi Generosa (PA), denominato impianto eolico di "Castellana Sicula", in località "Cozzo Bagianello".

Come da STMG formalizzata da Terna S.p.A., l'impianto eolico sarà collegato alla Rete Elettrica di Trasmissione Nazionale (RTN) mediante un cavidotto a 36 kV, il cui tratto finale interessa il Comune di Villalba (CL), dove è ubicata la Cabina Utente (CU) che costituisce l'interfaccia per la consegna dell'energia immessa alla RTN presso la Stazione Elettrica (SE) di trasformazione 380/150/36 kV di Terna, denominata "Caltanissetta". Il collegamento tra la CU e la sezione a 36 kV della SE sarà realizzato mediante un breve tratto di cavidotto interrato.

La presente relazione tecnica tratta la valutazione della gittata massima degli elementi rotanti per distacco accidentale, nell'ambito del progetto definitivo dell'impianto eolico di "Castellana Sicula".

L'esperienza di pluriennale esercizio dei moderni impianti eolici evidenzia come le turbine eoliche di grande taglia siano installazioni estremamente affidabili sotto il profilo meccanico-strutturale nonché ambientalmente sicure. Il distacco o la rottura della pala sono eventi che potrebbero verificarsi in situazioni accidentali al di fuori delle normali condizioni di funzionamento degli aerogeneratori. Inoltre, le turbine eoliche sono provviste di sistemi di monitoraggio delle condizioni strutturali che attivano i dispositivi di arresto in sicurezza quando le condizioni di funzionamento sono tali da compromettere l'integrità della macchina.

Come illustrato nei seguenti capitoli, pur essendo praticamente impossibile l'evento di distacco di un frammento di pala di dimensioni significative, per completezza di trattazione, la presente relazione considera il calcolo della gittata nel caso di distacco accidentale:

- della pala intera;
- di un frammento di pala di dimensioni pari a 10 m;
- di un frammento di pala di dimensioni pari a 5 m;
- di un frammento di pala di dimensioni pari a 1 m.

La sicurezza delle persone e i danni prodotti alle cose costituiscono un obiettivo imprescindibile nella progettazione di un parco eolico che, pertanto, deve tenere conto delle idonee distanze da edifici abitati o meno e dai luoghi con elevate frequentazioni di persone.

2. DATI STATISTICI

In letteratura non si trovano statistiche aggiornate riguardo ai guasti delle pale degli aerogeneratori. Secondo il *"Database about blade faults"* (Branner K. Ghadirian A. 2014) la probabilità di guasto determinata sulla base di rilevazioni degli anni precedenti si attesta tra lo 0,1% e lo 0,7% a seconda delle metodologie di calcolo.

Lo studio, che si riferisce a turbine operanti negli anni 1990 ÷ 2010 (con tecnologie ormai superate anche per quanto riguarda i dispositivi relativi alla sicurezza), mette in luce l'assenza di eventi di distacco delle pale e descrive possibili danneggiamenti per lo più riferibili a "escoriazione" delle parti superficiali della pala, con eventuale proiezione di piccoli frammenti di materiale composito con massa non significativa che hanno reso necessaria la riparazione della pala o una sua sostituzione.

Le pale sono tra i componenti più sollecitati meccanicamente in un aerogeneratore in quanto vengono sottoposte a sforzi correlati alla propria funzione, oltre ad essere esposte alle sollecitazioni esterne ambientali (pioggia, grandine, fulmini, turbolenza atmosferica, ecc). Le principali cause della rottura di una pala sono da ricercare nella fulminazione, nel cedimento per fatica, nella erosione di bordi e/o nell'appesantimento a causa della formazione di ghiaccio per le latitudini estreme.

I costruttori, soprattutto nell'ultimo quinquennio, hanno molto migliorato la progettazione, la scelta dei materiali, le tecniche costruttive e i sistemi di monitoraggio delle prestazioni, proprio al fine di ridurre le problematiche connesse al guasto delle pale, anche in relazione al consistente incremento delle lunghezze e dei pesi propri.

Il tasso d'incidentalità, nell'ultimo decennio, è ancora diminuito a seguito dell'evoluzione tecnologica e del miglioramento delle macchine eoliche, pur consentendo di aumentare considerevolmente le dimensioni di tutte le componenti meccaniche. Quest'ultime sono sottoposte a monitoraggio del comportamento dinamico mediante strumentazioni sempre più efficienti che consentono di programmare interventi manutenzione correttiva in presenza di malfunzionamenti.

La combinazione di coefficienti di sicurezza adottati nella progettazione delle turbine eoliche, i materiali utilizzati nella costruzione e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura rispettano le prescrizioni delle norme vigenti e in particolare la norma IEC61400-1 (turbine safety standard). In accordo a tale norma le pale degli aerogeneratori sono considerate "fail safe".

In base ad alcune statistiche di impianti eolici in esercizio, attualmente, si riscontrano guasti con necessità di sostituzione delle pale, anticipando l'eventuale distacco tipicamente nei primi 5 anni di vita, con una incidenza del 1% ÷ 3%, attribuendo il 2% dei casi a danneggiamenti provocati in fase di trasporto e/o durante le operazioni di montaggio.

Altri rari casi sono riconducibili a errati interventi di manutenzione programmata dell'aerogeneratore, evidentemente non eseguite secondo le indicazioni riportate nel manuale del costruttore. In particolare, il mancato controllo del serraggio dei dadi dei prigionieri che fissano la pala al mozzo può comportare una riduzione del precarico, con possibile rottura per fatica dei tiranti e il conseguente distacco della pala.

2.1 Rottura della pala

La rottura della pala, seppure con probabilità bassissima, potrebbe avvenire in corrispondenza del punto di discontinuità corrispondente all'attacco al mozzo del rotore per cedimento causato da precedenti danneggiamenti o da fenomeni di fatica.

Invece, come asserito da diversi costruttori sulla base di specifiche prove, è difficile il caso che si stacchi completamente solo una parte della pala; infatti, in caso di eventuale rottura, il pezzo rotto non sarebbe proiettato in volo, ma verrebbe trascinato fino all'immediata fermata dell'aerogeneratore. Questo tipo di rottura tende ad essere di tipo progressivo ed è normalmente rilevato dal sistema di diagnostica che arresta la macchina, con possibile urto dello spezzone della pala contro la torre di sostegno ed eventuale distacco con traiettorie imprevedibili ma, comunque, sempre con caduta del frammento nelle vicinanze dell'aerogeneratore.

2.2 Report Vestas

A titolo puramente informativo, si allega alla presente relazione (Allegato 1) il Report pubblicato nel 2011 del costruttore Vestas intitolato " *Calcolo della traiettoria di una pala eolica*

in condizioni nominali di funzionamento", nel quale sono riportati i risultati dei calcoli della distanza che una pala di un aerogeneratore raggiunge nel caso di distacco dal mozzo mentre la macchina è in funzione alla velocità nominale di rotazione.

Lo studio ha preso in considerazione il calcolo della gittata della pala intera per otto modelli di aerogeneratori diversi. Per l'aerogeneratore con caratteristiche più vicine a quello oggetto del presente progetto definitivo, ovvero l'aerogeneratore V126 (diametro rotore 126 m), è risultata una gittata massima di circa 150 m, valore considerato peraltro ampiamente conservativo tanto che nelle conclusioni dello stesso studio viene decrementato del 20% e portato a 120 m circa.

Infatti, su una flotta operativa di 15.679 unità, nel caso di distacco di una pala, il moto è sempre stato di tipo *"rotazionale complesso"* e le distanze raggiunte sono state inferiori a quelle calcolate nello stesso Report.

Nel documento si afferma 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 un collegamento bullonato".

A riprova di quanto asserito, a tutt'oggi non si sono verificati eventi di distacco di una sezione della pala sui modelli considerati nel Report, con un campione di 15.679 unità.

Danni all'estremità delle pale si sono spesso manifestati a causa di fulminazione atmosferica. Benché le pale siano dotate di un sistema di protezione dalle scariche atmosferiche che dovrebbe drenare a terra la corrente di fulmine, tuttavia, talvolta si è verificato un danneggiamento all'estremità della pala che si apre per la separazione dei gusci che la compongono ma che non ha mai provocato distacchi di frammenti di dimensioni e peso significativi.

Una fotografia riportata nel Report allegato rappresenta il tipico danno per fulminazione atmosferica diretta di una pala.

3. CARATTERISTICHE DELLA PALA

L'aerogeneratore Vestas V172, a parità di dimensioni del rotore, ha una gamma di potenze che variano da 6,2 MW a 7,2 MW con velocità di rotazione che variano da 4,3 rpm a 12,1 rpm (giri al minuto).

Ai fini della presente relazione si considerano le condizioni peggiori con velocità di rotazione massima. La seguente tabella riporta i principali dati caratteristici.

Potenza	7,0 MW
Diametro del rotore (D)	172 m
Lunghezza della pala (L_p)	84,35 m
Corda massima della pala	4,3 m
Peso della pala	26.000 kg
Altezza mozzo aerogeneratore	135 m
Velocità di rotazione	4,3 ÷ 12,1 rpm

Ai fini del calcolo della gittata massima è necessario determinare il raggio baricentrico che, considerata la geometria complessa e la distribuzione dei pesi, con buona approssimazione può essere considerato a 1/3 della lunghezza di pala.

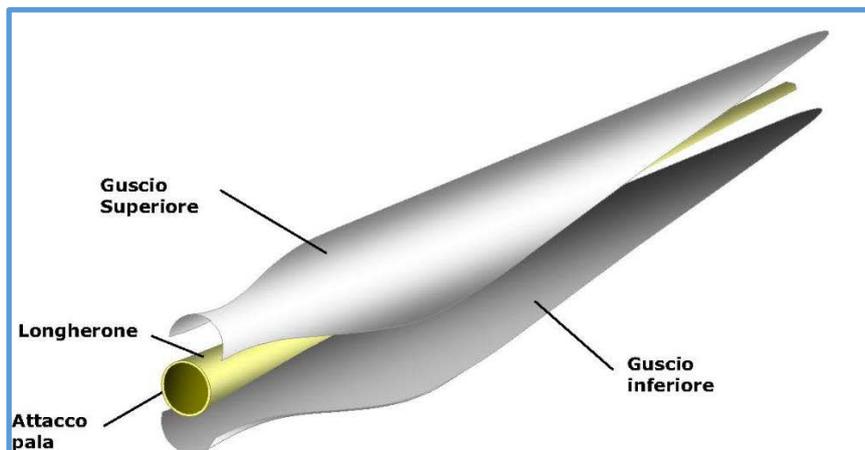


Figura 1: Schema costruttivo della pala di un aerogeneratore

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente compiti di forma (vedi Figura 1). Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante speciali incollaggi e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.

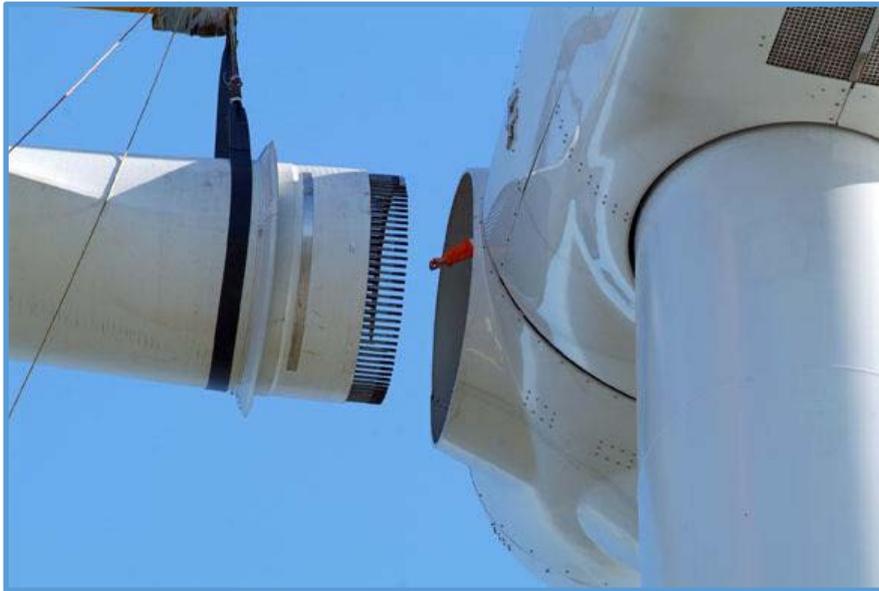


Figura 2: Particolare dell'attacco della pala al mozzo mediante prigionieri

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo mediante bulloni (prigionieri) serrati con dadi durante l'installazione della turbina (vedi Figura 2). Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai carichi di fatica, per questo motivo è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

4. CALCOLO DELLA GITTATA DELLA PALA O DI UN FRAMMENTO

In caso di rottura e distacco, la pala intera o il generico spezzone di pala (in seguito indicato genericamente come "corpo") tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano e, a causa delle diverse pressioni cinetiche esercitate dal vento, intorno a ciascuno dei due assi principali appartenenti al proprio piano.

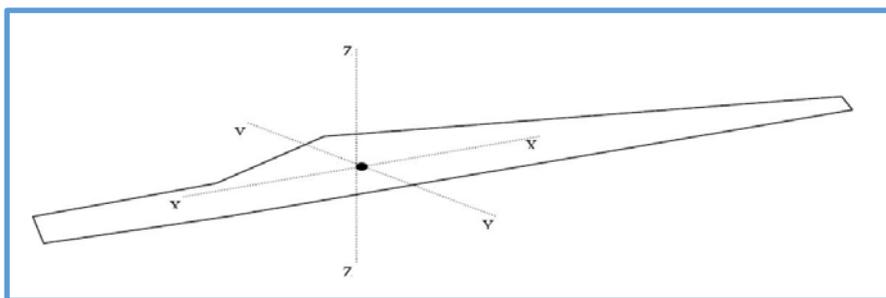


Figura 3: Assi di rotazione della pala nel moto complesso

La determinazione della reale gittata, in funzione delle condizioni iniziali e al contorno, è estremamente complessa a causa dell'influenza di un elevato numero di fattori, pertanto, le stime semplificate di seguito condotte hanno l'obiettivo di pervenire ad un valore indicativo di riferimento.

Tutte le approssimazioni e semplificazioni proposte, in ogni caso, sono a vantaggio della sicurezza in quanto producono risultati della gittata massima con approssimazione in eccesso, come stabilito anche nel citato Report Vestas (prec. § 2.2).

Il distacco di un corpo dal rotore in movimento attiva, oltre alla traslazione, un moto rotatorio complesso la cui energia cinetica rotazionale genera delle turbolenze e viene dissipata dalle forze di attrito. Di queste dissipazioni non si terrà conto nel calcolo che pertanto risulterà prudentiale.

Le ipotesi di calcolo, pertanto, possono essere:

- a) moto in regime laminare, cioè con il corpo che si muove con il suo asse costantemente tangente alla traiettoria, quindi senza rotazioni o ribaltamenti (moto non rotatorio complesso), e che il flusso dell'aria lungo la superficie del corpo sia in regime laminare, quindi di minimo attrito viscoso;
- b) moto in regime turbolento, cioè con il corpo che si muove ancora con il suo asse costantemente tangente alla traiettoria, quindi senza rotazioni o ribaltamenti (moto non rotatorio complesso), e che il flusso dell'aria lungo la superficie del frammento risulti turbolento, quindi con un effetto di attrito viscoso più simile alla realtà.

E' opportuno ricordare che le ipotesi di assetto geometrico del corpo in volo tipo giavellotto sono quelle che conducono alla massima gittata, il cui valore è da ritenere di bassa probabilità ed estremamente cautelativo.

Si deve infine tenere conto che la gittata esprime la distanza orizzontale percorsa dal baricentro del frammento e pertanto, specialmente nel caso di distacco della pala si deve aggiungere la porzione di pala che va dal baricentro alla punta della pala (cautelativamente 2/3 della lunghezza pala).

Nel modello considerato, una volta che il corpo si sarà distaccato le forze inerziali agenti saranno solo la forza di gravità e le forze viscosse dovute alla resistenza prodotta dall'aria.

La velocità di rotazione al momento del distacco, presa in considerazione per il calcolo, è quella massima indicata dal costruttore, in quanto i sofisticati sistemi di controllo dell'aerogeneratore, attivando i freni e i dispositivi di imbardata, non permetterebbero al rotore di ruotare ad una velocità maggiore di quelle indicate nelle specifiche tecniche.

Le assunzioni del modello sono le seguenti:

1. si fa riferimento al baricentro del corpo (sulla base di forma e dimensione opportunamente stimate) e si applicano ad esso le equazioni del moto;
2. si assume come velocità iniziale v_0 il vettore applicato al baricentro nel momento del distacco, avente come modulo la velocità tangenziale corrispondente alla massima velocità angolare di esercizio per un raggio pari alla distanza del baricentro dal centro di rotazione e come direzione quella della tangente alla circonferenza di rotazione del baricentro nel punto del distacco;
3. si determina con metodo iterativo l'angolo α_0 che, sulla base dei parametri geometrici, rende massima la gittata;
4. si assume come riferimento del moto il piano x, y , pertanto, il vettore velocità v_0 ha le componenti v_{0x} e v_{0y} al tempo iniziale ($t=0$) corrispondente al distacco.

Nello studio del moto di un corpo rigido in presenza di resistenza dell'aria, tale resistenza può essere considerata come una forza dipendente linearmente dal modulo della velocità del corpo e avente verso opposto al moto dello stesso, dando luogo ad una nuova accelerazione avente componenti sia lungo l'asse x che lungo l'asse y esprimibili come:

$$\begin{cases} a_x = -\mu v_x \\ a_y = -g - \mu v_y \end{cases}$$

dove μ è il coefficiente d'attrito viscoso dell'aria.

Poiché:

$$a_x = \frac{d}{dt} v_x \qquad a_y = \frac{d}{dt} v_y$$

sostituendo avremo:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} v_x = -\mu v_x \\ \frac{d}{dt} v_y = -g - \mu v_y \end{cases}$$

risolvendo queste equazioni differenziali e tenendo conto delle condizioni iniziali:

$$v_x(t=0) = v_{0x} \qquad v_y(t=0) = v_{0y}$$

si arriva alle equazioni che descrivono l'andamento temporale delle velocità:

$$\begin{cases} v_x(t) = v_{0x} e^{-\mu t} \\ v_y(t) = \frac{-g}{\mu} + (v_{0y} + \frac{g}{\mu}) e^{-\mu t} \end{cases}$$

Ma v_x e v_y sono esprimibili, rispettivamente, come derivata dello spazio percorso lungo le direzioni x e y cioè:

$$v_x = \frac{d}{dt} x \qquad v_y = \frac{d}{dt} y$$

per cui andando nuovamente a sostituire ed integrando si ottiene:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} x = v_{0x} e^{-\mu t} \\ \frac{d}{dt} y = \frac{-g}{\mu} + (v_{0y} + \frac{g}{\mu}) e^{-\mu t} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x(t) = x_0 + \frac{v_{0x}}{\mu} (1 - e^{-\mu t}) \\ y(t) = y_0 - \frac{g}{\mu} t + \frac{v_{0y} + \frac{g}{\mu}}{\mu} (1 - e^{-\mu t}) \end{cases}$$

Si osserva che le relazioni di cui sopra possono essere scritte ponendo $\mu = \frac{k}{m}$, essendo k la costante di proporzionalità tra la forza di attrito viscoso rispetto alla velocità e m la massa del corpo, come riportato qui di seguito:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + \frac{m}{k} v_{0x} (1 - e^{-\frac{kt}{m}}) \\ y(t) = y_0 - \frac{m}{k} g t + \frac{m}{k} (\frac{m}{k} g + v_{0y}) (1 - e^{-\frac{kt}{m}}) \end{cases} \quad (1)$$

Si deve notare che il termine k è dipendente essenzialmente dalla forma del corpo e può avere una variabilità assai ampia, descritta dall'espressione (ben nota in letteratura):

$$k = \frac{1}{2} C \rho S v_0 \quad v_0 = 2 \pi n / 60 \quad (2)$$

Dove:

C è il coefficiente di penetrazione aerodinamica del corpo, dipende dalla forma ed è variabile tra 0,1 e 2;

ρ è la densità dell'aria (1,225 kg/m³)

S è la superficie del corpo vista nel piano perpendicolare al moto

v_0 è la velocità iniziale del baricentro

n velocità di rotazione in giri al minuto

E' noto che la pala ha lunghezza 84,35 m e la corda massima è di 4,3 m che si suppone di riportare alla base, nel punto di attacco al mozzo. Semplificando la complessa geometria della pala, si può pensare di approssimarne la forma con un trapezio isoscele avente base maggiore di 4,3 m, base minore 0,7 m e altezza di 84,35 m, ricavando una superficie di 210 m² nel piano x, y del moto.

Si ipotizza, cautelativamente sempre a favore della sicurezza, che la massa sia distribuita proporzionalmente alla superficie del trapezio considerato come schematizzazione della pala.

Di seguito è riportato il calcolo della gittata massima (G_{max}) e la distanza massima (D_{max}) nei tre casi in studio.

1) Intera pala

Mediante le formule (2) sopra riportate con i seguenti dati:

$$C = 0,5 \text{ (valore prudenziale di buona penetrazione aerodinamica)}$$

$$S = 4 \text{ m}^2$$

$$m = 26.000 \text{ kg}$$

si ottengono con molto buona approssimazione:

$$k = 46,2 \quad \Rightarrow \quad \mu = k/m \cong 0,002$$

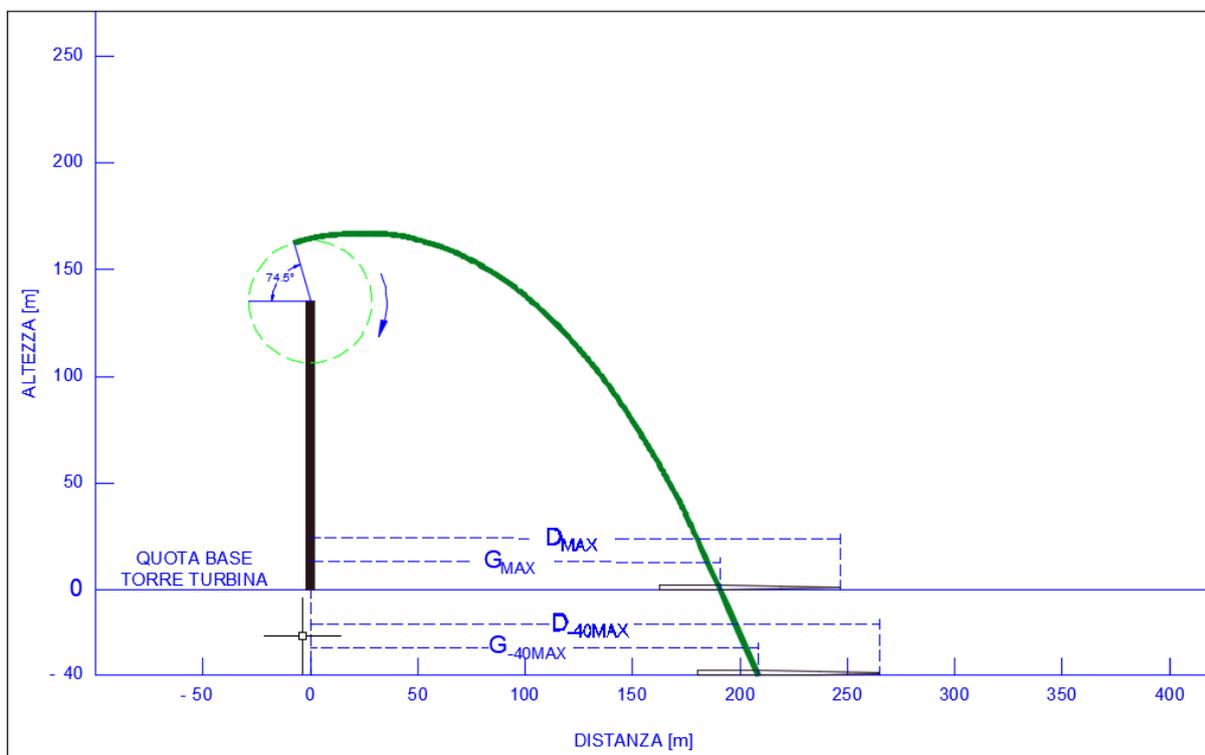


Figura 4: Gittata pala intera

Il grafico di Figura 4, ottenuto risolvendo il sistema di equazioni (1) sopra riportate, rappresenta i punti della traiettoria e fornisce i seguenti risultati:

- angolo distacco = $74,5^\circ$
- tempo di volo = 7,25 s
- gittata massima (G_{max}) = 191 m
- distanza massima di impatto (D_{max}) = 247 m (sommando 2/3 lunghezza pala)

Poiché il territorio di installazione dell'aerogeneratore non è pianeggiante, l'impatto del corpo proiettato potrebbe cadere ad una quota più alta, con minore gittata, o ad una quota più

bassa, con maggiore gittata. Cautelativamente, si considera che il corpo impatti ad una quota più bassa di 40 m rispetto alla quota di installazione della turbina eolica e, pertanto, si ottengono i seguenti risultati:

- gittata massima (G_{-40max}) = 209 m
- distanza massima di impatto (D_{-40max}) = 265 m

2) Frammento di 10 m dell'estremità pala

Mediante le formule (2) sopra riportate con i seguenti dati:

$C = 0,5$ (valore prudenziale di buona penetrazione aerodinamica)

$S = 0,5 \text{ m}^2$

$m = 1.380 \text{ kg}$ (rispetto alla superficie stimata di $11,2 \text{ m}^2$ sul totale di 210 m^2)

si ottengono con molto buona approssimazione:

$$k = 15,7 \quad \Rightarrow \quad \mu = k/m \cong 0,01$$

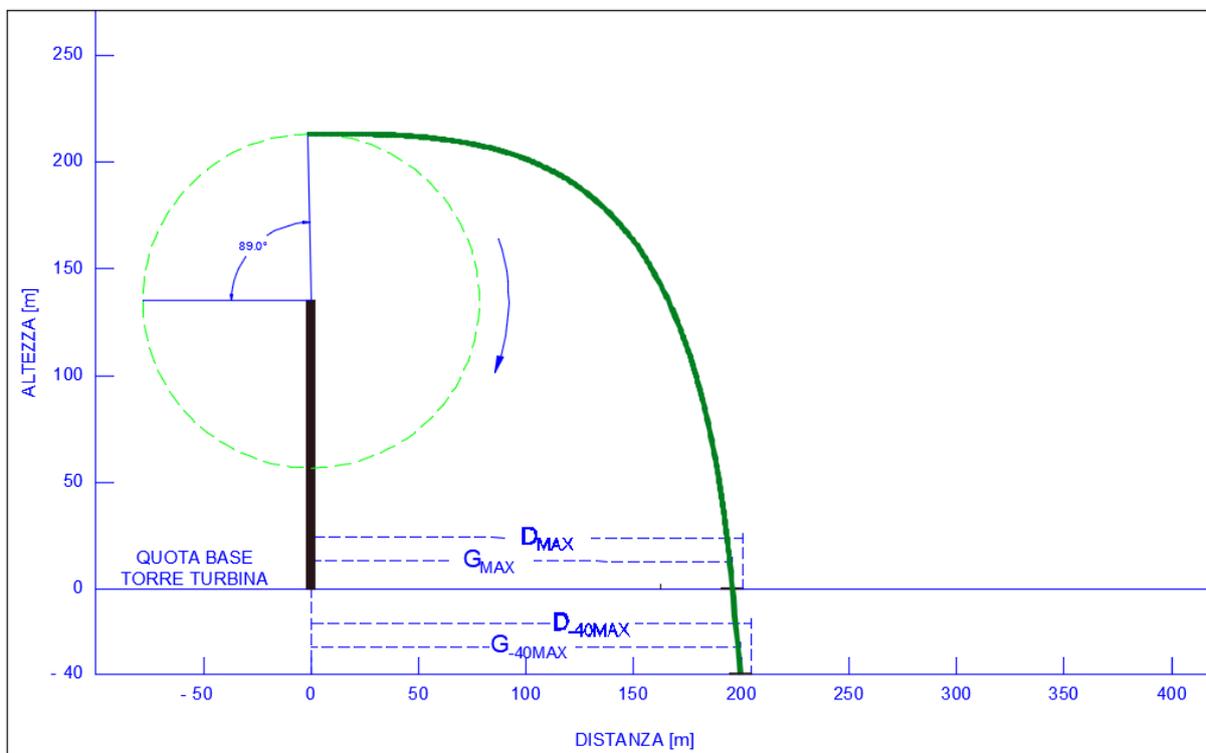


Figura 5: Gittata frammento 10 m

Il grafico di Figura 5, ottenuto risolvendo il sistema di equazioni (1) sopra riportate, rappresenta i punti della traiettoria e fornisce i seguenti risultati:

- angolo distacco = $89,0^\circ$
- tempo di volo = 9,8 s
- gittata massima (G_{\max}) = 196 m
- distanza massima di impatto (D_{\max}) = 201 m (sommando 1/2 lunghezza frammento)

Poiché il territorio di installazione dell'aerogeneratore non è pianeggiante, l'impatto del corpo proiettato potrebbe cadere ad una quota più alta, con minore gittata, o ad una quota più bassa, con maggiore gittata. Cautelativamente, si considera che il corpo impatti ad una quota più bassa di 40 m rispetto alla quota di installazione della turbina eolica e, pertanto, si ottengono i seguenti risultati:

- gittata massima ($G_{-40\max}$) = 200 m
- distanza massima di impatto ($D_{-40\max}$) = 205 m

3) Frammento di 5 m dell'estremità pala

Mediante le formule (2) sopra riportate con i seguenti dati:

$$C = 0,4 \text{ (ottima penetrazione aerodinamica per estrema prudenza)}$$

$$S = 0,25 \text{ m}^2$$

$$m = 619 \text{ kg (rispetto alla superficie stimata di } 5 \text{ m}^2 \text{ sul totale di } 210 \text{ m}^2)$$

si ottengono con molto buona approssimazione:

$$k = 6,49 \quad \Rightarrow \quad \mu = k/m \cong 0,01$$

Il grafico di Figura 6 ottenuto risolvendo il sistema di equazioni (1) sopra riportate, rappresenta i punti della traiettoria e fornisce i seguenti risultati:

- angolo distacco = $89,0^\circ$
- tempo di volo = 10 s
- gittata massima (G_{\max}) = 201 m
- distanza massima di impatto (D_{\max}) = 204 m (sommando 1/2 lunghezza frammento)

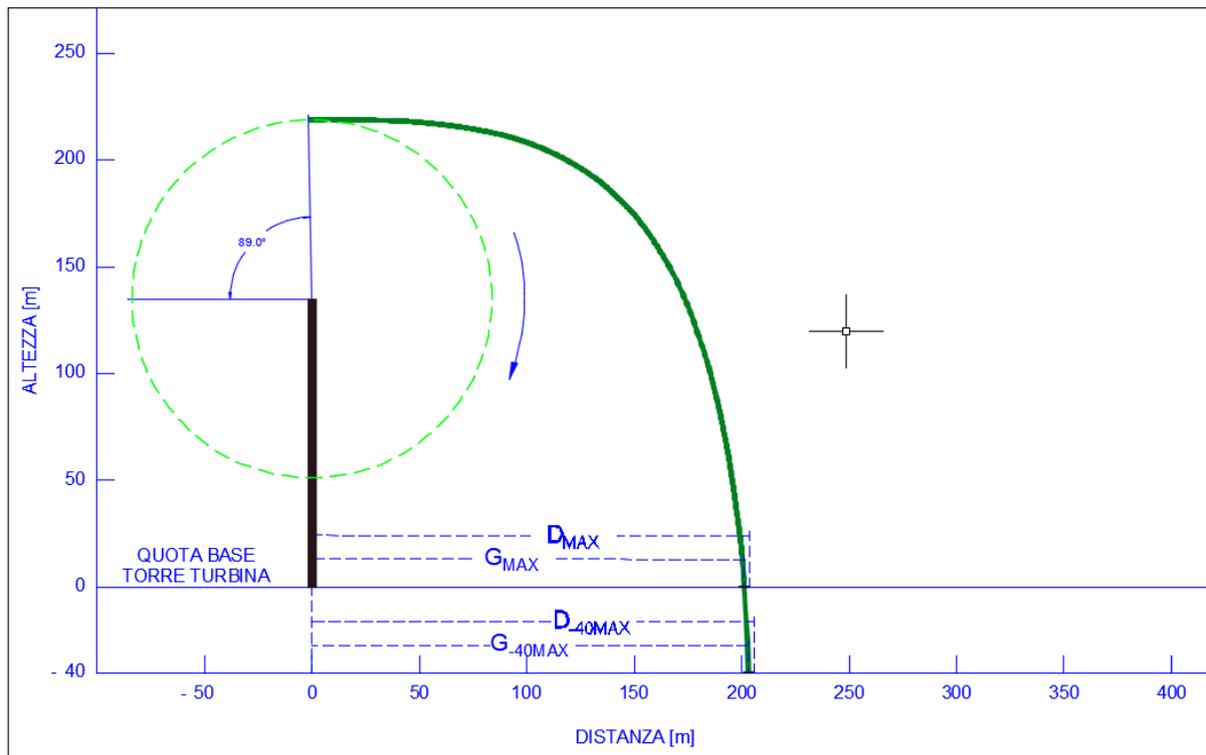


Figura 6: Gittata frammento 5 m

Poiché il territorio di installazione dell'aerogeneratore non è pianeggiante, l'impatto del corpo proiettato potrebbe cadere ad una quota più alta, con minore gittata, o ad una quota più bassa, con maggiore gittata. Cautelativamente, si considera che il corpo impatti ad una quota più bassa di 40 m rispetto alla quota di installazione della turbina eolica e, pertanto, si ottengono i seguenti risultati:

- gittata massima (G_{40max}) = 203 m
- distanza massima di impatto (D_{40max}) = 206 m

4) Frammento di 1 m dell'estremità pala

Mediante le formule (2) sopra riportate con i seguenti dati:

$C = 0,25$ (ottima penetrazione aerodinamica per estrema prudenza)

$S = 0,1 \text{ m}^2$

$m = 185 \text{ kg}$ (rispetto alla superficie stimata di $1,5 \text{ m}^2$ sul totale di 210 m^2)

si ottengono con molto buona approssimazione:

$$k = 1,7 \quad \Rightarrow \quad \mu = k/m \cong 0,009$$

Il grafico di Figura 7 ottenuto risolvendo il sistema di equazioni (1) sopra riportate, rappresenta i punti della traiettoria e fornisce i seguenti risultati:

- angolo distacco = $89,0^\circ$
- tempo di volo = 9,8 s
- gittata massima (G_{\max}) = 221 m
- distanza massima di impatto (D_{\max}) = 222 m (sommando lunghezza frammento)

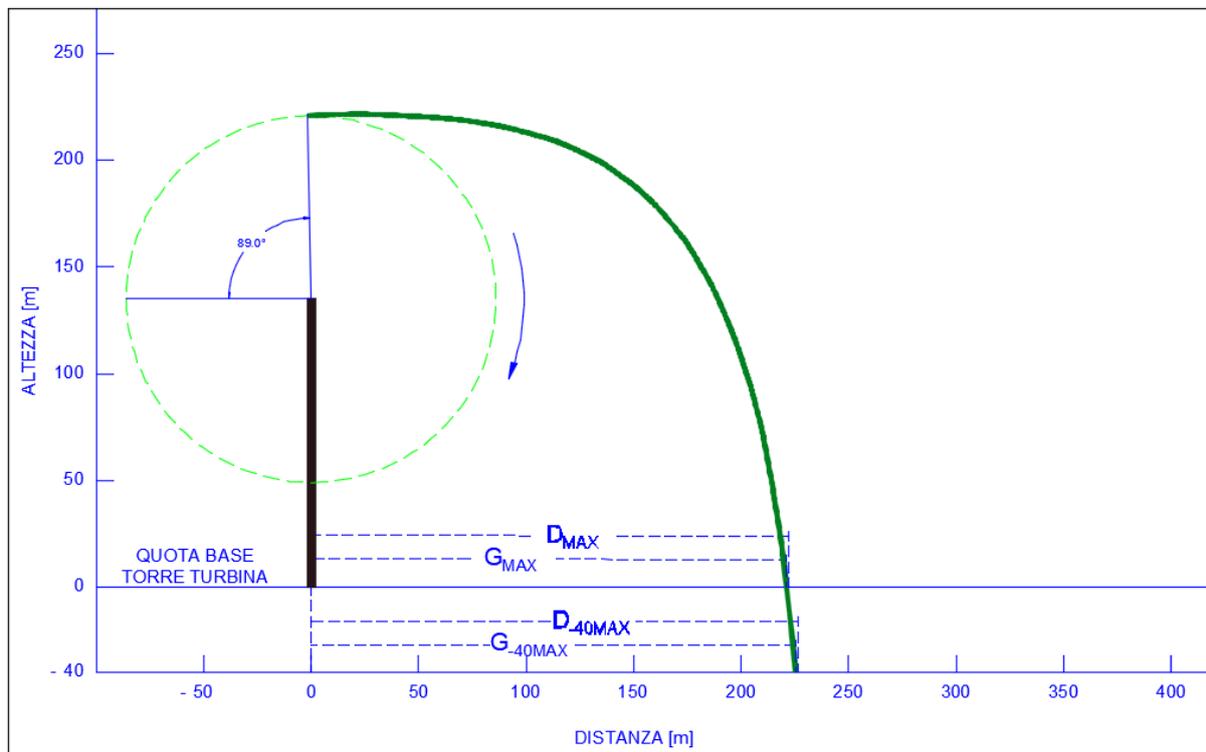


Figura 7: Gittata frammento 1 m

Poiché il territorio di installazione dell'aerogeneratore non è pianeggiante, l'impatto del corpo proiettato potrebbe cadere ad una quota più alta, con minore gittata, o ad una quota più bassa, con maggiore gittata. Cautelativamente, si considera che il corpo impatti ad una quota più bassa di 40 m rispetto alla quota di installazione della turbina eolica e, pertanto, si ottengono i seguenti risultati:

- gittata massima ($G_{40\max}$) = 226 m
- distanza massima di impatto ($D_{40\max}$) = 227 m

5. CONCLUSIONI

La presente relazione tecnica ha trattato la valutazione della gittata massima degli elementi rotanti per distacco accidentale, nell'ambito del progetto definitivo dell'impianto eolico denominato "Castellana Sicula". La determinazione della reale gittata, in funzione delle condizioni iniziali e al contorno, è estremamente complessa a causa dell'influenza di un elevato numero di fattori, pertanto, le stime semplificate sono state eseguite con l'obiettivo di pervenire ad un valore indicativo di riferimento utilizzando criteri cautelativi (stime delle gittate in eccesso).

Il calcolo è stato eseguito, a favore della sicurezza, considerando il movimento del corpo con il proprio asse costantemente tangente alla traiettoria (tipo giavellotto), quindi senza rotazioni o ribaltamenti (moto non rotatorio complesso), e considerando il flusso turbolento dell'aria lungo la superficie del frammento, con un effetto di attrito viscoso più simile alla realtà.

Tutte le approssimazioni e semplificazioni proposte, in ogni caso, sono a vantaggio della sicurezza in quanto producono risultati della gittata massima con approssimazione in eccesso.

Le distanze massime di impatto nei tre casi studiati, considerando la condizione peggiorativa di atterraggio ad una quota di 40 m sotto la quota di installazione dell'aerogeneratore, sono risultate:

- **intera pala $D_{-40MAX} = 265$ m**
- **frammento di 10 m dell'estremità pala $D_{-40MAX} = 205$ m**
- **frammento di 5 m dell'estremità pala $D_{-40MAX} = 206$ m**
- **frammento di 1 m dell'estremità pala $D_{-40MAX} = 227$ m**

Nei casi reali, la distanza di impatto a terra calcolata in accordo con il metodo precedentemente illustrato sarà verosimilmente inferiore, sia per le condizioni iniziali al momento del distacco, che non necessariamente saranno quelle teoriche per una gittata massima (velocità di rotazione e angolo di distacco), sia per i moti rotazionali della pala, dovuti ai momenti delle forze resistenti, che comporteranno ulteriori dissipazioni di energia e condizioni generalmente meno favorevoli per il moto.

Si deve anche considerare una ulteriore riduzione della probabilità di impatto con edifici abitati o meno e verso luoghi con elevate frequentazioni di persone, in quanto l'eventuale remota

possibilità di distacco dovrebbe accadere proprio quando la turbina eolica ha il piano del rotore orientato verso uno di questi bersagli.

Con riferimento alle condizioni insediative dell'area di intervento, si evidenzia l'assenza di fabbricati, così come di luoghi con elevata frequentazione antropica, entro la distanza risultante di rispetto dalle postazioni di tutti gli aerogeneratori dell'impianto eolico.

Allegato 1

Vestas technical report

Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento

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:

- V52-850kW con una pala di lunghezza pari a 25 m e una velocità di rotazione massima a regime di 26 RPM posto su una torre di altezza pari a 75 m;
- V80-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 39 m e una velocità di rotazione massima a regime di 19,2 RPM posto su una torre di altezza pari a 80 m;
- V82-1,65MW con una pala di lunghezza pari a 40 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,4 RPM posto su una torre di altezza pari a 78 m;
- V90-1,8MW con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 RPM posto su una torre di altezza pari a 105 m;
- V90-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 RPM posto su una torre di altezza pari a 105 m;
- V90-3,0MW con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 16.1 RPM posto su una torre di altezza pari a 105 m;
- V100-1,8MW 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 125 m;
- V100-2.6MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 13.4 RPM posto su una torre di altezza pari a 80 m;
- V112-3,0MW 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 119 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 V52-850kW, V82-1,65MW, V90-1,8MW, V90-2,0MW, V90-3,0MW, V100-1,8MW, V100-2.0MW, V100-2.6MW, V112-3,0MW si è fatto uno studio considerando la condizione più conservativa e cioè considerando le sole forze inerziali ed escludendo l'attrito, per cui i risultati ottenuti sono da considerare del 20% maggiori di quelli reali.

2 Risultati

I risultati dell'analisi indicano che con lo studio più complesso (caso 3) 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 V52-850kW è di ca. 130 m, per la V82-1,65MW è di ca. 103 m, per la V90-1,8-2,0MW è di ca. 118 m, per la V90-3,0MW è di ca. 77 m, per la V100-1,8MW è di circa 104 m, per la V100-2,0MW è di circa 98 m, per la V100-2,6MW è di circa 77.4 m e infine per la V112-3,0MW è c. 147 m (per la V52-850kW, V82-1,65MW, V90-1,82,0MW, V90-3,0MW, V100-1,8MW, V100-2,0MW, V100-2,6MW e per la V112-3,0MW, unico caso studiato quello conservativo, ma non reale 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

La velocità di distacco della pala dal rotore è stata incrementata del 16% passando da 26 a 31 RPM per la V52-850kW, del 5% per la V80-2,0MW, passando così da 19 a 20 RPM; per la V82-1,65MW e V90-1,8MW-2,0MW, invece, è stata incrementata del 10% passando così da 14,4 a 15,84 e da 14,9 a 16,39 RPM rispettivamente, per la V90-3,0MW è stata incrementata del 5% passando da 14,9 a 15,7 RPM, per la V100-1,8MW è stata incrementata del 5% passando da 16.6 a 17.4 RPM, per la V100-2.0MW è stata incrementata del 5% passando da 14.9 a 15.6 RPM, per la V100-2.6MW è stata incrementata del 5% passando da 13.4 a 14.1 RPM e per la V112-3,0MW è stata incrementata del 5% passando da 17.7 a 18.6 RPM.

Pertanto, la velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della pala per la:

- V52-850kW è pari a 31 RPM;
- V80-2,0MW è pari a 20 RPM;
- V82-1,65MW è pari a 15,84 RPM;
- V90-1,8MW è pari a 16,39 RPM;
- V90-2,0MW è pari a 16,39 RPM;
- V90-3,0MW è pari a 15,7 RPM;
- V100-1,8MW è pari a 17.4 RPM;
- V100-2,0MW è pari a 15.6 RPM;
- V100-2,6MW è pari a 14.1 RPM;
- V112-3,0MW è pari a 18.6 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
V90-1,8MW	44	87,84	25,69	2,37	6660
V82-1,65MW	40	86	23,2	2,08	6200
V80-2,0MW	39	81,46	22,8	2,38	6300
V52-850kW	25,3	53,83	14,67	1,55	1900
V90-2,0MW	44	87,84	25,69	2,37	6660
V90-3,0MW	44	87,84	25,69	2,37	6700
V100-1,8MW	49	-	-	-	7500
V100-2,0MW	49	-	-	-	7500
V100-2,6MW	49	-	-	-	7500
V112-3,0MW	54,6	-	-	-	13500

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

8 Esperienze e note statistiche

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

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

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

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

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

8.1 DISTACCO DI UNA DELLE PALE DAL ROTORE

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

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

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

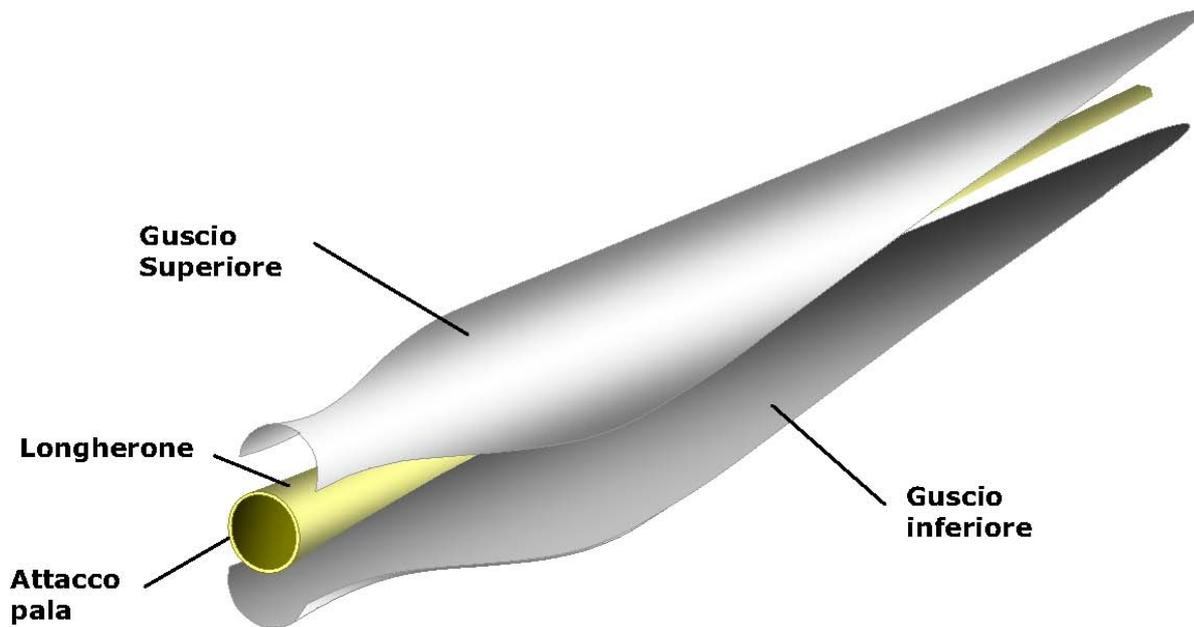


Figura 1: Schema strutturale di una pala eolica

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.

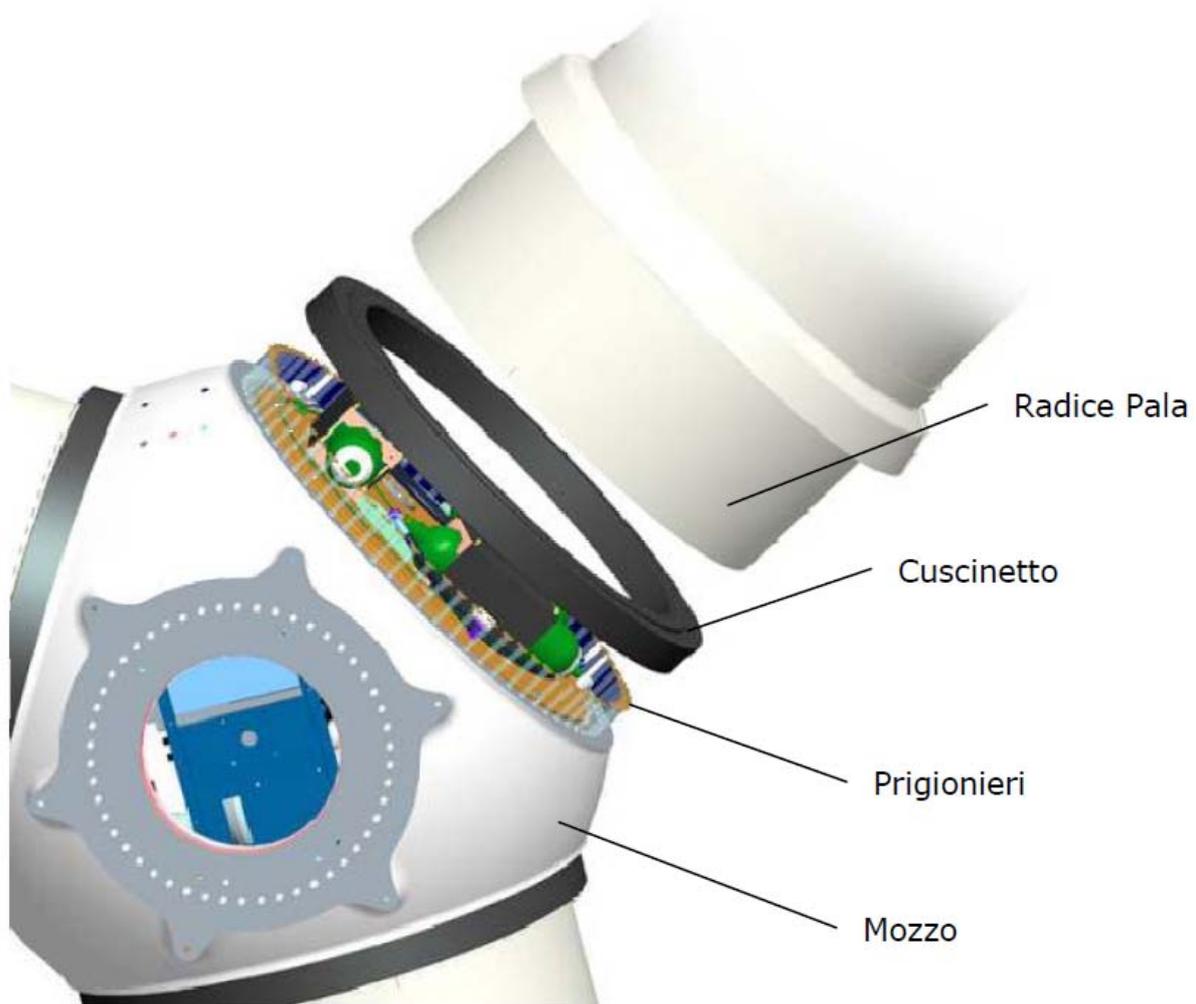


Figura 2: Dettagli dell'attacco di una pala al mozzo

8.2 ROTTURA (APERTURA) DELL'ESTREMITÀ DI PALA

Questo tipo di incidente si è quasi sempre 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 ad un evento ceraunico hanno dimensioni e pesi così esigui da non permettere valutazioni circa eventuali traiettorie e gittate. Queste sono comunque determinate quasi esclusivamente dal trasporto degli stessi ad opera del vento.



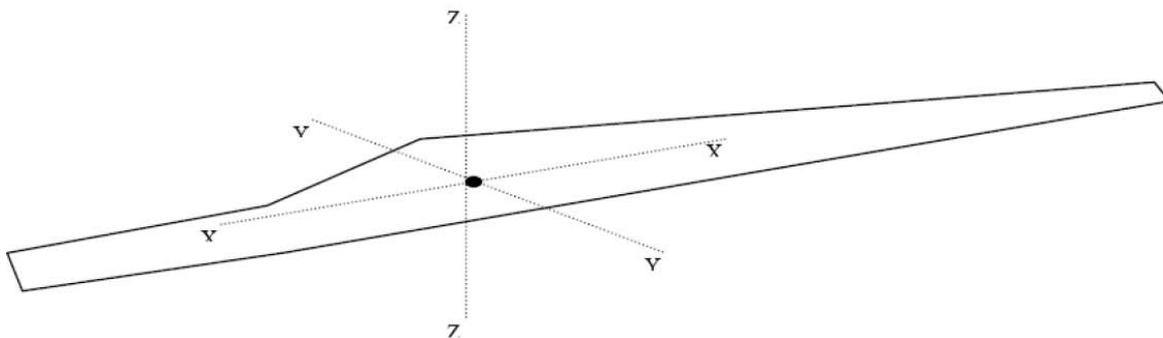
Figura 3: Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica

9 Conclusioni

I Casi 1, 2a, 2b e 2c dimostrano che, se la traiettoria di volo è ‘irrotazionale’, allora la distanza raggiunta dalla pala da 25,3m (V52-850kW) sarà di circa 130m, dalla pala da 39m (V802,0MW) sarà di ca. 125 m, dalla pala da 40m (V82-1,65MW) sarà di circa 105m e da 44m (V90-1,8MW-2,0MW) sarà di ca. 117 m, dalla pala da 44m (V90-3MW) sarà di ca. 76m, dalla pala da 49m (V100-1,8MW) sarà di ca. 104m, dalla pala da 49m (V100-2,0MW) sarà di ca. 98m, dalla pala da 49m (V100-2,6MW) sarà di ca. 77,4m mentre dalla pala da 54.6m (V112 3,0 MW) sarà di ca. 147m. 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 V52-850kW (25,3m di lunghezza) è di circa 104 m, di una V80-2,0MW (39 m di lunghezza) è di ca. 99.6m, di una V82-1,65MW sarà di ca. 82.5m, di una V90-1.8MW2,0MW (44 m di lunghezza) sarà di ca. 94m, di una V90-3,0MW sarà di ca. 61.4m, di una V100-1,8MW sarà di ca. 83m, di una V100-2.0MW sarà di ca. 78, di una V100-2.6MW sarò di ca. 62 e di una V112-3,0MW sarà di ca. 118m (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 1,8MW	Pala V82 1,65MW	Pala V52 850kW	Pala V90 2,0MW	Pala V90 3,0MW	Pala V100 1,8MW	Pala V100 2,0MW	Pala V100 2,6MW	Pala V112 3,0MW
Velocità di rotazione	20	16,39	15,84	31	16,39	15,7	17,4	15,6	14,1	18,4
Tempo di volo	7,6	7,76	6,27	7,63	7,76	6,84	6,7	7	6	7,7
Distanza Vettoriale	99,6	94	82,5	104	94	61,4	83	78	62	118

Gli altri casi sono stati studiati solo per la V80-2,0MW quindi non sono rilevanti per il caso in questione.