

**IMPIANTO DI PRODUZIONE DI ENERGIA DA FONTE EOLICA
"SAN PANCRAZIO TORREVECCHIA" DI POTENZA PARI A 34,50 MW**

**REGIONE PUGLIA
PROVINCIA di BRINDISI**

COMUNE di SAN PANCRAZIO SALENTINO

Località: Masserie Corte Finocchio, Torre Vecchia e Campone

OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI: San Pancrazio S. (BR) Erchie (BR) ed Avetrana (TA)

**PROGETTO DEFINITIVO
Id AU H4QPRN5**

Tav.:

Titolo:

R30

**GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI
PER ROTTURA ACCIDENTALE**

Scala:

Formato Stampa:

Codice Identificatore Elaborato

N.A.

A4

H4QPRN5_DocumentazioneSpecialistica_30

Committente:

STC S.r.l.



Via V. M. STAMPACCHIA, 48 - 73100 Lecce
Tel. +39 0832 1798355
studiocalcarella@gmail.com - fabio.calcarella@gmail.com

Direttore Tecnico: Dott. Ing. Fabio CALCARELLA



TOZZIgreen

Via Brigata Ebraica, 50 - 48123 Mezzano (RA)
Tel. +39 0544 525311 - Fax +39 0544 525319
pec: tozzi.re@legalmail.it - www.tozziholding.com

Data	Motivo della revisione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:
16 febbraio 2018	Prima emissione	STC	FC	TOZZI GREEN S.p.a.
25 giugno 2018	Rev-1. Calcolo del moto in fluido viscoso	STC	FC	TOZZI GREEN S.p.a.

Sommario

1. PREMESSA.....	2
2. STUDIO VESTAS	3
3. GITTATA-ANALISI TEORICA E MODELLO MATEMATICO	4
4. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO PALA INTERA	9
5. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO FRAMMENTO 10 m.....	11
6. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO FRAMMENTO 1 m.....	13
7. CONCLUSIONI.....	15

1. PREMESSA

La presente relazione è riferita al calcolo della gittata massima di elementi rotanti in caso di rottura accidentale ad integrazione della Relazione R30 (*HW0A162_DocumentazioneSpecialistica_30*) facente parte della documentazione di progetto che la società Tozzigreen S.p.a. ha elaborato per la realizzazione e l'esercizio di un impianto eolico di potenza pari a 34,5 MW, costituito da 10 aerogeneratori in località Masserie Corte Finocchio, Torre Vecchia e Campone in agro di San Pancrazio Salentino in provincia di Brindisi. A tal riguardo si precisa che, nell'elaborato appena citato, il calcolo della gittata massima nel caso di rottura dell'intera pala aveva restituito il valore di 277 m con angolo pari a $\Theta = 21^\circ$. Come sottolineato nello stesso documento, tale valore teorico non tiene conto delle forze di attrito viscoso e della complessità del moto rotazionale, ovvero della rotazione della pala durante il moto di caduta. Di tali condizioni più realistiche si tiene conto nella presente relazione che affronterà il calcolo anche nel caso di rottura di frammenti di pala con specifico riferimento a frammenti di lunghezza pari a 1 m e 10m.

Ciascun aerogeneratore sarà tripala ad asse orizzontale costituito da una torre tubolare metallica a tronco di cono alta 132 m e con un diametro di base di circa 4,5 m. In cima alla torre troverà alloggio la navicella cui è collegato il rotore di diametro pari a 136 m, per un'altezza massima complessiva del sistema torre-pale di 200 m (TIP). La velocità del rotore sarà variabile e compresa nel range 5,6-15,3 giri/minuto, così come indicato dal costruttore.

In questa sede sarà effettuato il calcolo della gittata modellizzando, con opportune semplificazioni, il moto della pala o di un frammento di pala nell'aria considerando l'attrito viscoso o se si preferisce l'attrito dell'aria prodotto su di esso durante la caduta.

Anche in questo caso, si sottolinea fin d'ora che tutte le approssimazioni e semplificazioni proposte sono a vantaggio della sicurezza, ovvero producono risultati con approssimazione in eccesso della gittata massima in caso di rottura di elementi rotanti, poiché il calcolo sarà fondato su un modello puramente balistico.

La determinazione dell'equazione del moto nel caso di un distacco di un corpo dal rotore in movimento è molto complesso. E' evidente però che si tratta di un moto rotazionale complesso in quanto il corpo, quando inizierà il suo moto libero, continuerà anche a ruotare per l'ineluttabile legge fisica di conservazione della quantità del moto. Quindi nel moto libero (dopo il distacco) una parte dell'energia cinetica posseduta dal corpo verrà dissipata nel moto rotazionale che finirà per generare turbolenze. Di queste dissipazioni non si terrà conto nel calcolo che pertanto sarà prudenziale.

Una volta che il corpo si sarà distaccato le forze inerziali agenti saranno 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. E' evidente che i sofisticati sistemi di controllo non

permetterebbero al rotore dell'aerogeneratore di ruotare ad una velocità maggiore di quelle indicate nelle specifiche tecniche.

2. STUDIO VESTAS

Il costruttore degli aerogeneratori Vestas Wind Systems A/S ha prodotto un documento denominato “*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. Il calcolo è stato eseguito per otto modelli di aerogeneratori diversi. Per l'aerogeneratore con caratteristiche più vicine a quello oggetto della presente relazione, ovvero l'aerogeneratore V126 (diametro rotore 126 m), è prevista **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.

Nel richiamato documento “Vestas”, che per completezza alleghiamo alla presente relazione, in realtà non sono chiarite le condizioni al contorno considerate nell'esecuzione dei calcoli ed in particolare non è definita l'altezza della torre tubolare di sostegno degli aerogeneratori, parametro non trascurabile nel calcolo della gittata. Pertanto, pur ritenendo opportuno eseguire specifici calcoli indicando chiaramente tutte le ipotesi iniziali e utilizzando le equazioni del moto in un fluido viscoso (aria), riteniamo di condividere pienamente alcune affermazioni ed osservazioni del documento di Vestas, in particolare:

- 1) Su una flotta operativa di 15.679 unità, nel caso di distacco di una pala il moto è stato di tipo “*rotazionale complesso*” e le distanze raggiunte sono state inferiori a quelle calcolate nello stesso Report;
- 2) Eventi di distacco di una sezione della pala non si sono verificati a tutt'oggi sui modelli considerati nel Report (e quindi su 15.679 unità). Danni all'estremità delle pale si sono spesso manifestati a causa di fulminazione atmosferica. Infatti benché le pale siano dotate di un sistema di protezione dalle scariche atmosferiche che dovrebbe drenare a terra la corrente di fulmine, 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***. Il tipico danno per fulminazione atmosferica diretta di una pala è quello riportato nella foto qui sotto.



Estremità della pala danneggiata da fulminazione atmosferica

Come affermato nel documento di Vestas che qui si allega, *“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”*.

Ad ogni modo nei paragrafi seguenti pur ritendo l’evento di distacco di un frammento di pala di dimensioni significative praticamente impossibile per completezza di trattazione si riporta il calcolo della gittata nel caso di distacco accidentale di frammenti di pala di dimensioni pari a 10 m, 5 m, 1 m.

3. GITTATA-ANALISI TEORICA E MODELLO MATEMATICO

Sarà preso in considerazione il calcolo della gittata modellizzando, con opportune semplificazioni, il moto della pala o di un frammento di pala (in seguito indicato genericamente come “corpo”) nell’aria considerando l’attrito viscoso o se si preferisce l’attrito dell’aria prodotto su di esso durante la caduta.

Sottolineiamo fin d’ora che tutte le approssimazioni e semplificazioni proposte sono a vantaggio della sicurezza, ovvero producono risultati con approssimazione in eccesso della gittata massima

in caso di rottura di elementi rotanti, poiché il calcolo sarà fondato su un modello puramente balistico.

La determinazione dell'equazione del moto nel caso di un distacco di un corpo dal rotore in movimento è molto complesso. E' evidente però che si tratta di un moto rotazionale complesso in quanto il corpo, quando inizierà il suo moto libero, continuerà anche a ruotare per l'ineluttabile legge fisica di conservazione della quantità del moto. Quindi nel moto libero (dopo il distacco) una parte dell'energia cinetica posseduta dal corpo verrà dissipata nel moto rotazionale che finirà per generare turbolenze. Di queste dissipazioni non si terrà conto nel calcolo che pertanto sarà prudenziale.

Una volta che il corpo si sarà distaccato le forze inerziali agenti saranno 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. E' evidente che i sofisticati sistemi di controllo non permetterebbero al rotore dell'aerogeneratore di ruotare ad una velocità maggiore di quelle indicate nelle specifiche tecniche.

Le assunzioni del modello sono:

- 1) Si fa riferimento al baricentro del corpo (sulla base di forma e dimensione opportunamente ipotizzate) e si applicano ad esso le equazioni del moto.
- 2) Si assume come velocità iniziale V_0 il vettore applicato nel baricentro di cui al punto precedente al 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 nello stesso baricentro al moto circolare da esso mantenuto fino al momento del distacco.
- 3) Si determina l'angolo α_0 per il quale la gittata è massima. La definizione di questo valore avviene per tentativi successivi, e dipende essenzialmente dalla geometria del sistema (altezza torre tubolare, diametro rotore, dimensioni della pala o del frammento) e dalla velocità di rotazione al momento del distacco.
- 4) Si tiene conto, nel volo e nella traiettoria del corpo, della spinta generata dal vento in direzione ortogonale al piano del rotore che per convenzione porremo come il piano XZ e che tenderà a spostare il corpo stesso dal piano di rotazione XZ del rotore. La velocità di spinta del vento considerata è quella massima a cui funziona l'aerogeneratore (cut off).
- 5) Si ipotizza la temperatura ambientale di 40°C, che minimizza alle condizioni d'esercizio la densità atmosferica e quindi l'attrito viscoso.
- 6) Il modulo della forza di attrito agente sulla pala (o sul frammento) in moto libero dopo il distacco è dato dalla formula.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}^2$$

Dove:

- ρ_{aria} è la densità dell'aria che cambia in relazione alla quota altimetrica del sito di installazione degli aerogeneratori ma anche in base alle dimensioni e quindi massime altezze raggiunte dal sistema torre tubolare + rotore
- C_d è il coefficiente di attrito ampiamente dipendente dalle caratteristiche geometriche della pala. Sulla base di dati riportati in letteratura tale valore è stato assunto pari a 1
- A è la superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria
- V_{xz} è il modulo della proiezione del vettore velocità del corpo sul piano XZ misurata con riferimento al baricentro del corpo

7) Il moto libero di un corpo di massa nota M sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto, quindi, dalle seguenti equazioni:

$$a_x = d^2x/dt^2 = -1/M \times F_D \times \cos\alpha$$

$$a_y = d^2y/dt^2 = \frac{1}{2} \rho_{\text{aria}} \times C_d \times A \times (w - V_y)^2 / M$$

$$a_z = d^2z/dt^2 = -1/M \times (F_D \times \sin\alpha + M \times g)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{\text{aria}} \times C_d \times A \times V_{xz}^2$$

Dove:

- α rappresenta l'arcotangente del rapporto V_z / V_x e cambia da istante a istante durante il moto libero di caduta;
- w è il modulo della velocità del vento, supposta ortogonale al piano XZ e costante per tutta la durata del moto;
- V_y è il modulo della componente della velocità del corpo avente la stessa direzione del vento;
- g è l'accelerazione di gravità.

Le condizioni al contorno indipendenti sono:

- temperatura ambiente e velocità del vento, impostate nei valori estremi di esercizio come precedentemente esposto;
- altezza della torre, quota s.l.m. delle sue fondazioni ed eventuale dislivello del territorio circostante;
- massa M , area efficace A , lunghezza L posizione del baricentro del corpo distaccato (posta a $1/3$ della lunghezza nel caso dell'intera pala e a $1/2$ nel caso di un frammento);
- α_0 viene inizializzato al valore arbitrario di 20° , prossimo a valori descritti in letteratura per analoghi esperimenti;

- si pongono ascissa e ordinata del baricentro del corpo al momento del distacco $X_0=0$ e $Y_0=0$ (fissando l'origine del sistema di riferimento cartesiano come oltre precisato);
- si pone la componente iniziale del vettore velocità in direzione del vento $V_{y0}=0$, in quanto tale vettore, nel momento del distacco, è determinato dal solo movimento del rotore che è supposto ortogonale al vento stesso;

Dalle precedenti dipendono le seguenti ulteriori condizioni:

- quota di distacco Z_0 ;
- densità atmosferica ρ_{aria} iniziale;
- componenti iniziali V_{x0} e V_{z0} del vettore velocità e tutte le componenti del vettore accelerazione;

La soluzione del sistema di equazioni viene determinata con il metodo di Eulero che è un metodo iterativo per la risoluzione di equazioni differenziali partendo dalle condizioni al contorno. Tale soluzione ci permetterà di definire il moto del corpo distaccato nello spazio tridimensionale rappresentato in un sistema cartesiano ortogonale XYZ, in cui:

- il piano XY rappresenta il piano orizzontale, corrispondente al livello del mare;
- il piano XZ viene fatto coincidere con il piano su cui giace il rotore (ortogonale alla direzione del vento);
- il piano YZ viene fissato, ortogonalmente agli altri due piani coordinati, facendo coincidere l'origine del sistema con la proiezione sul piano XY del baricentro del corpo nell'istante del distacco.

Con questa rappresentazione geometrica è evidente che al momento della definizione della gittata massima si dovrà tenere in conto della lunghezza del corpo in caduta, ma anche della geometria del modello. Ora, poiché la gittata è calcolata a partire dal centro torre, dovrà essere calcolata la distanza tra centro torre e punto di caduta del baricentro del corpo distaccato.

Nel punto di caduta si dovrà tenere poi in conto della lunghezza del frammento o della pala. Pertanto in definitiva la gittata massima, sarà uguale a:

$$G_{Max} = \text{distanza (centro torre, punto di caduta)} + L/2 \text{ (nel caso del frammento di lunghezza } L)$$

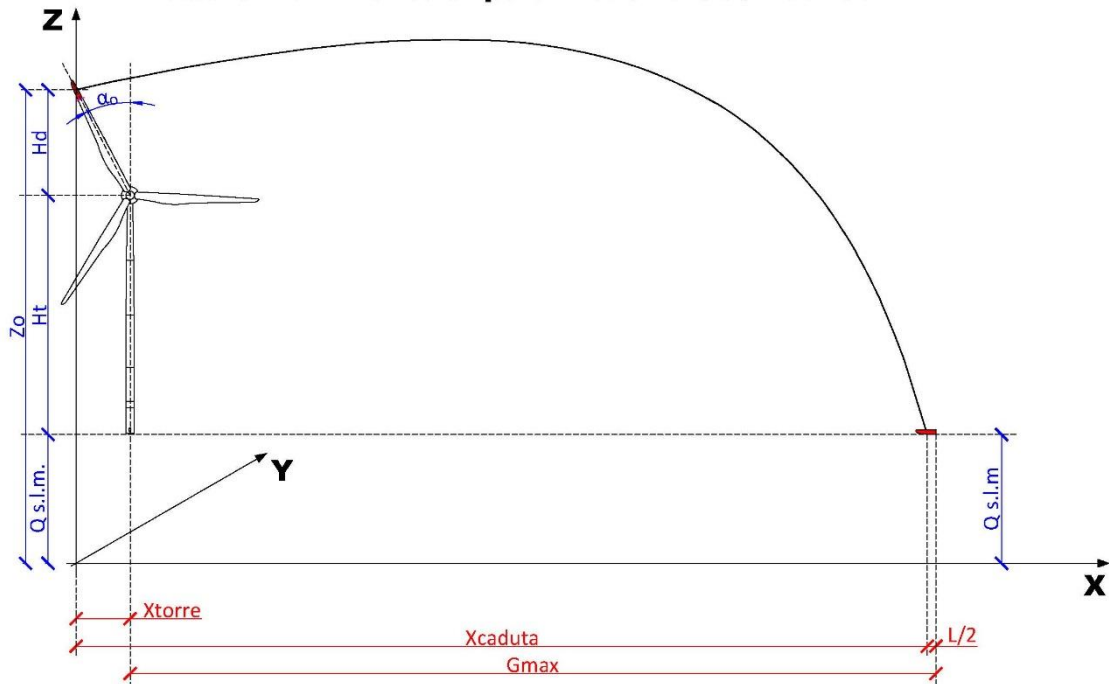
$$G_{Max} = \text{distanza (centro torre, punto di caduta)} + 2/3L \text{ (nel caso di pala intera di lunghezza } L)$$

Una volta impostato e risolto il modello con riferimento al valore di inizializzazione di α_0 si è proceduto per tentativi, provando a variare α_0 , di un grado per volta, nella direzione in cui G_{Max} risultava aumentare e fino a che non si registrava un decremento, individuando in tal modo il valore di α_0 che massimizza G_{Max} .

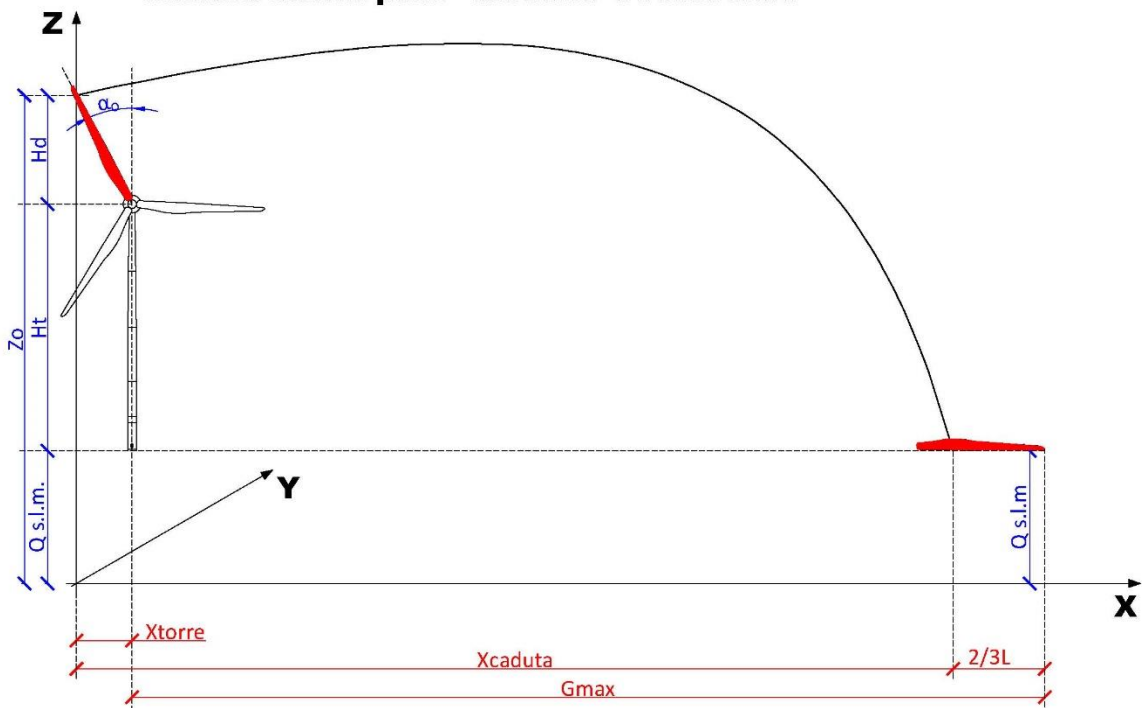
In figura la geometria del sistema, nel caso di distacco del frammento di pala o della pala intera.

E' importante notare che trattandosi di un'area pianeggiante la quota del punto di caduta della pala o del frammento di pala è la stessa della base della torre. Questo non sarebbe in generale possibile nel caso in cui, per esempio, l'aerogeneratore è posizionato sulla cresta di una collina.

Rottura frammento di pala Modello Geometrico



Rottura intera pala - Modello Geometrico



4. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO PALA INTERA

Come detto il moto libero di un corpo di massa nota M sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto, dalle seguenti equazioni:

$$a_x = d^2x/dt^2 = -1/M \times F_D \times \cos\alpha$$

$$a_y = d^2y/dt^2 = 1/2 \rho_{aria} \times C_d \times A \times (w - V_y)^2 / M$$

$$a_z = d^2z/dt^2 = -1/M \times (F_D \times \sin\alpha + M \times g)$$

$$F_D = 1/2 \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}^2$$

L'equazione differenziale è risolta con il metodo iterativo di Eulero, rispetto alle variabili x , y e z . Nell'istante in cui z assume il valore pari al livello previsto per l'impatto (che nel caso in esame corrisponde a 60 m, ovvero la quota media della base torre s.l.m.), il punto di caduta del baricentro della pala è calcolato (teorema di Pitagora) dai corrispondenti valori di x e y nello stesso istante. La Gittata massima sarà poi ottenuta in base alle caratteristiche geometriche del frammento e dell'intero sistema, ovvero l'estensione massima del frammento rispetto al baricentro e la distanza del centro torre dall'asse z del sistema di riferimento. In pratica:

$$G_{Max} = X_{caduta} - X_{torre} + 2/3L \text{ (pala intera di lunghezza } L)$$

Nel caso di distacco dell'intera pala i parametri assumeranno i seguenti valori:

- $M = 14.150$ kg dato del costruttore Vestas relativo al peso dell'intera pala
- Altezza mozzo $Q_t = 132$ m, diametro rotore 68 m, lunghezza pala 66,6 m, velocità di rotazione 15,3 g/min, che è la velocità massima consentita così come da specifiche del costruttore
- La posizione del baricentro della pala a 1/3 della lunghezza della pala, quindi più vicina al centro di rotazione.
- $C_d = 1$, sulla base di dati riportati in letteratura
- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, si assume pari a 122 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala (lunghezza 66.6 m, larghezza massima 4.10 m, altezza massima 3.00 m), e del moto rotazionale complesso a cui la pala è soggetta in caso di distacco.
- Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo α_0 a cui avviene il distacco. Nel caso in esame il risultato è stato $\alpha_0 = 17^\circ$ o 18° .
- In considerazione del fatto che il terreno nell'intorno degli aerogeneratori di progetto è pressoché pianeggiante si è fatta l'ulteriore ipotesi che la $Q_{s.l.m.}$ (Quota sul livello del mare) del punto di caduta sia la stessa della base della torre. $Q_{s.l.m.} = 60$ m, sulla base dei valori rilevati in sito.

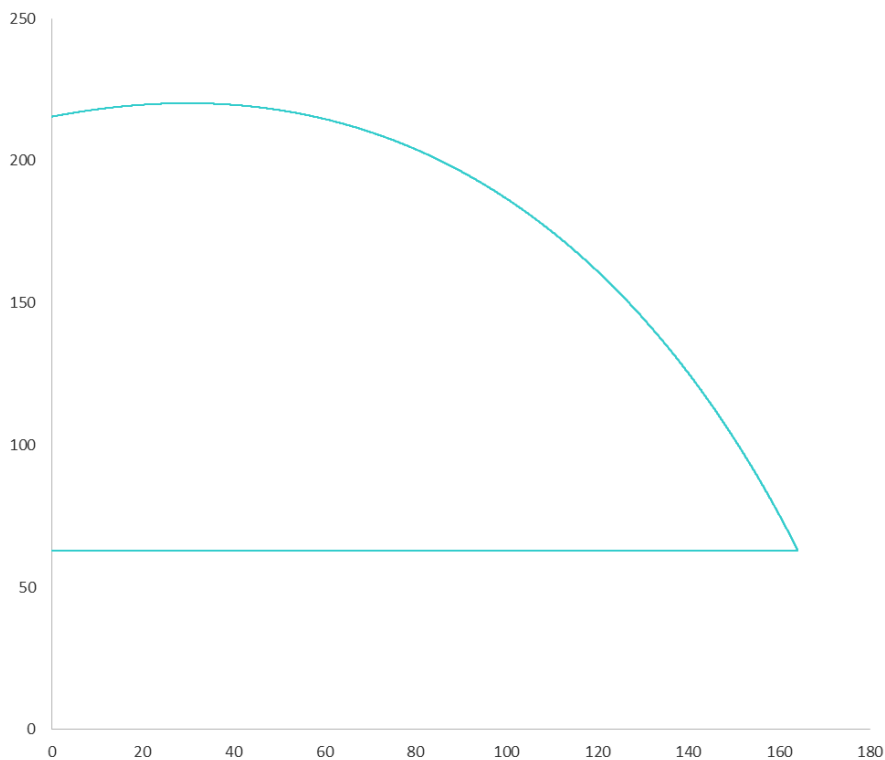
- Si è considerata la velocità massima del vento di 22,5 m/s a cui funziona l'aerogeneratore. Oltre questa velocità le pale vanno in stallo e non ruotano. La velocità del vento determina una componente del moto che è perpendicolare al piano di rotazione del rotore.
- Densità dell'aria $\rho = 0,898$, pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 200 m s.l.m. (valori limite che determinano le condizioni più sfavorevoli nel calcolo).

Il valore della gittata massima ottenuto dal calcolo è

$$G_{Max} = 204,76 \text{ m}$$

Con tempo di permanenza in volo di 7,4 secondi circa. Nel grafico la traiettoria del moto che, ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

Traiettoria con gittata massima



5. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO FRAMMENTO 10 m

Benché, come detto, il distacco di un frammento di pala è da considerarsi un evento pressoché impossibile di seguito si riporta il valore della gittata massima come soluzione dell'equazione differenziale più volte richiamata, nel caso di un frammento di lunghezza pari a 10 m.

I parametri fisici e geometrici che si assumeranno saranno i seguenti:

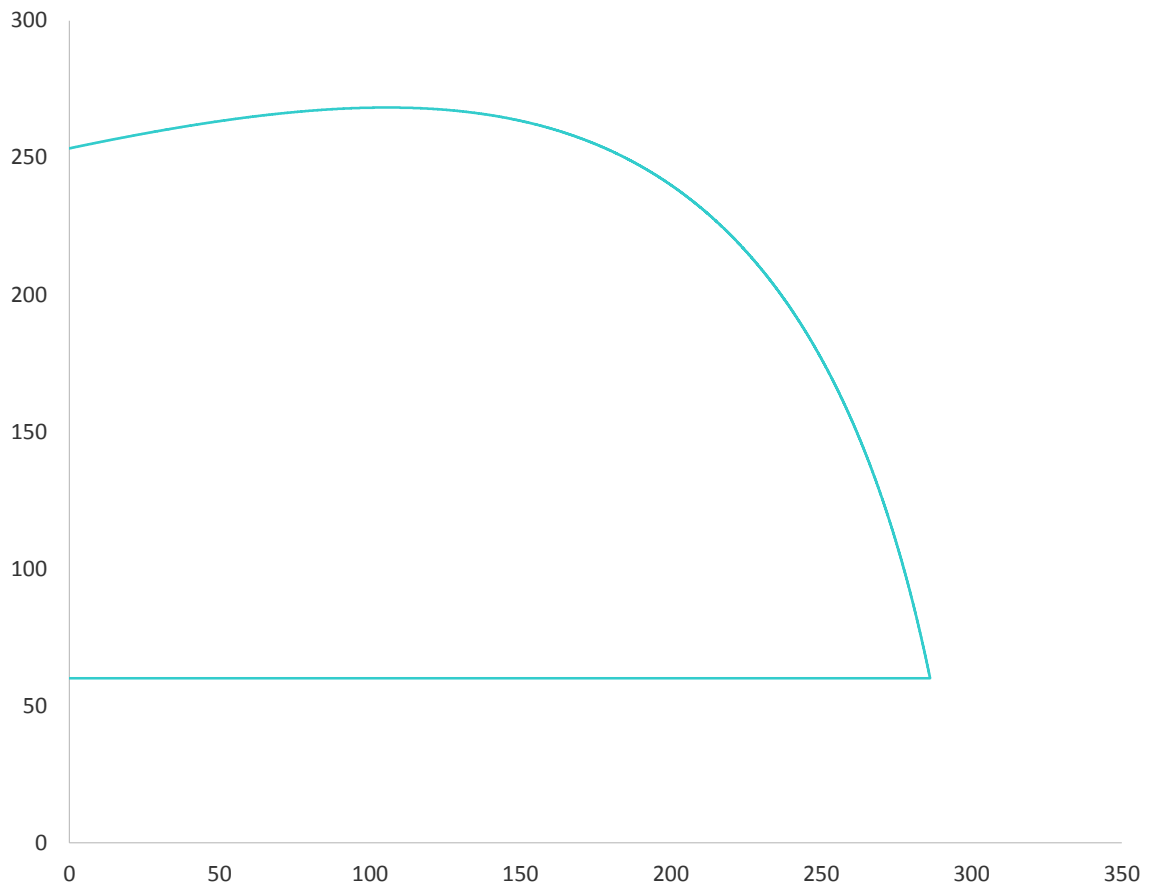
- $M = 1.200$ kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo
- Altezza mozzo $Q_t = 132$ m, diametro rotore 68 m, lunghezza pala 66,6 m, lunghezza frammento 10 m, velocità di rotazione 15,3 g/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore).
- La posizione del baricentro della pala a 1/2 della lunghezza del frammento.
- $C_d = 1$, sulla base di dati riportati in letteratura
- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, si assume pari a 17 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala e del frammento e del moto rotazionale complesso a cui il frammento è sottoposto.
- Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo α_0 a cui avviene il distacco. Nel caso in esame il risultato è stato $\alpha_0 = 13^\circ$.
- In considerazione del fatto che il terreno nell'intorno degli aerogeneratori di progetto è pressoché pianeggiante si è fatta l'ulteriore ipotesi che la $Q_{s.l.m.}$ (Quota sul livello del mare del punto di caduta sia la stessa della base della torre). $Q_{s.l.m.} = 60$ m, sulla base dei valori rilevati in sito.
- Si è considerata la velocità massima del vento di 22,5 m/s a cui funziona l'aerogeneratore. Oltre questa velocità le pale vanno in stallo e non ruotano. La velocità del vento determina una componente del moto che è perpendicolare al piano di rotazione del rotore.
- Densità dell'aria $\rho = 0,898$, pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 200 m s.l.m. (valori limite che determina la condizione più sfavorevole nel calcolo).

Il valore della gittata massima ottenuto dal calcolo è

$$G_{Max} = 291,96 \text{ m}$$

Con tempo di permanenza in volo di 9,7 secondi circa. Nel grafico la traiettoria del moto che, ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

Traiettoria con gittata massima - frammento L=10m



6. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO FRAMMENTO 1 m

Nel caso in cui il frammento di pala che subisce il distacco sia di lunghezza pari a 1 m, i parametri fisici e geometrici che sia assumeranno saranno i seguenti:

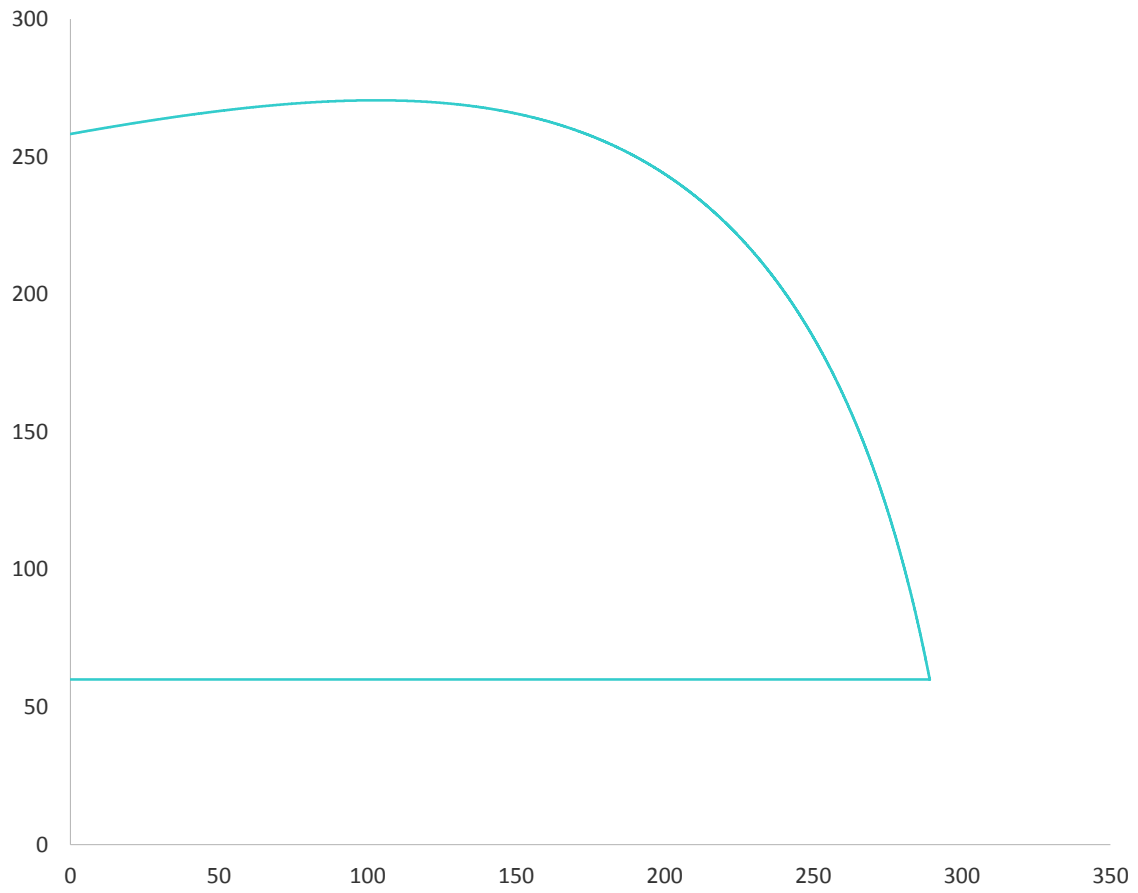
- $M = 120$ kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo
- Altezza mozzo $Q_t = 132$ m, diametro rotore 68 m, lunghezza pala 66,6 m, lunghezza frammento 1 m, velocità di rotazione 15,3 g/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore).
- La posizione del baricentro a 1/2 della lunghezza del frammento.
- $C_d = 1$, sulla base di dati riportati in letteratura
- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, si assume pari a 1,8 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala e del frammento e del moto rotazionale complesso a cui il frammento è sottoposto.
- Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo α_0 a cui avviene il distacco. Nel caso in esame il risultato è stato $\alpha_0 = 11^\circ$.
- In considerazione del fatto che il terreno nell'intorno degli aerogeneratori di progetto è pressoché pianeggiante si è fatta l'ulteriore ipotesi che la $Q_{s.l.m.}$ (Quota sul livello del mare del punto di caduta sia la stessa della base della torre). $Q_{s.l.m.} = 60$ m, sulla base dei valori rilevati in sito.
- Si è considerata la velocità massima del vento di 22,5 m/s a cui funziona l'aerogeneratore.
- Densità dell'aria $\rho = 0,898$, pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 200 m s.l.m. (valori limite che determinano le condizioni più sfavorevoli nel calcolo).

Il valore della gittata massima ottenuto dal calcolo è

$$G_{Max} = 288,96 \text{ m (frammento } L=1 \text{ m)}$$

Con tempo di permanenza in volo di 10,2 secondi circa. Nel grafico la traiettoria del moto che, ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

Traiettoria con gittata massima _ Frammento L=1m



7. CONCLUSIONI

La definizione del moto di una pala di un aerogeneratore o di un frammento di pala è un problema alquanto complesso. E' certo d'altra parte sulla base dell'esperienza e di semplici considerazioni fisiche (conservazione della quantità di moto) che trattasi di un moto rotazionale complesso in un fluido viscoso (aria).

Il moto libero di un corpo di massa nota M sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto, dalle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned}a_x &= d^2x/dt^2 = -1/M \times F_D \times \cos\alpha \\a_y &= d^2y/dt^2 = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times (w - V_y)^2 / M \\a_z &= d^2z/dt^2 = -1/M \times (F_D \times \sin\alpha + M \times g) \\F_D &= \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}^2\end{aligned}$$

In particolare F_D è la forza di attrito dovuta alla resistenza dell'aria sul corpo in movimento che è direttamente proporzionale al quadrato della velocità ma, dipende dalla densità dell'aria ρ_{aria} , da forma e superficie dell'elemento in movimento (A , C_D). Attribuendo opportuni valori ai vari coefficienti si sono risolte le equazioni differenziale, con il metodo iterativo di Eulero, rispetto alle variabili x , y e z . Da queste poi è stata calcolata la gittata sulla base di considerazioni geometriche. Dal momento che sono stati considerati per ciascun parametro valori ampiamente conservativi e mettendosi nelle condizioni di esercizio più gravose (massima velocità di rotazione, massima velocità del vento) il valore della gittata calcolato si può considerare ampiamente conservativo, pertanto da considerarsi quale Gittata Massima. Il valore calcolato per la Gittata massima dell'intera pala nel caso di rottura accidentale è il seguente:

$$\mathbf{G_{Max} = 204,76 \text{ m (pala intera)}}$$

Il calcolo è stato poi eseguito risolvendo le stesse equazioni nel caso in cui il distacco fosse riferito a frammenti di pala, benché tale evento è da considerarsi pressoché impossibile, con i seguenti risultati:

$$\mathbf{G_{Max} = 291,96 \text{ m (Frammento } L=10 \text{ m)}}$$

$$\mathbf{G_{Max} = 288,96 \text{ m (Frammento } L=1 \text{ m)}}$$

Dai risultati è evidente che:

- 1) Nel caso dell'intera pala il notevole peso (14.150 kg), incide notevolmente sulla lunghezza della traiettoria, oltre che sul tempo di volo.
- 2) I frammenti quanto più piccoli (e quindi leggeri) sono, tanto minore è il valore della gittata

3) I valori della gittata sono tutti dipendenti dall'angolo α_0 a cui avviene il distacco. In tutti i casi il valore dell'angolo massimo per cui si ha il valore massimo della gittata è stato definito per tentativi.

4) Anche nel caso peggiore la gittata si mantiene al di sotto dei 300 m.

E' importante infine rimarcare che il costruttore degli aerogeneratori di progetto (Vestas) dichiara (si veda documento allegato) che la rottura di un frammento di pala è da escludere in considerazione delle caratteristiche costruttive delle pale stesse. Tale affermazione è peraltro avvalorata dalla statistica, su un campione di 15.679 unità di aerogeneratori di grande taglia del tipo di quelli in progetto tale evento non si è mai verificato. Il distacco dell'intera pala è invece potenzialmente possibile, e sempre secondo il costruttore, dovuto ad una cattiva manutenzione (verifica del corretto serraggio dei *prigionieri* che incardinano la pala al centro del rotore).

Nello stesso documento sono dati i risultati dei calcoli della gittata per diversi tipi di aerogeneratori di grossa taglia. In particolare per l'aerogeneratore V126 è indicata una gittata massima di circa 150 m (peraltro decrementabile del 20%), senza che però nello stesso documento siano indicate le altezze delle torri tubolari di sostegno degli aerogeneratori.

Lecce, maggio 2018