

IMPIANTO DI PRODUZIONE DI ENERGIA DA FONTE EOLICA
"Masseria Muro" DI POTENZA PARI A 90 MW

REGIONE PUGLIA
PROVINCIA di BRINDISI

PARCO EOLICO E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI:
Mesagne, Brindisi, San Donaci, San Pancrazio, Cellino San Marco

PROGETTO DEFINITIVO
Id AU ORE7Q71

Tav.:

Titolo:

30

Gittata massima elementi rotanti per rottura
accidentale

Scala:

Formato Stampa:

Codice Identificatore Elaborato:

n.a.

A4

ORE7Q71_DocumentazioneSpecialistica_30

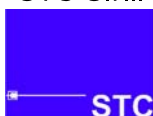
Progettazione:

Committente:

STC S.r.l.

Via V. M. STAMPACCHIA, 48 - 73100 Lecce
Tel. +39 0832 1798355
fablo.calcarella@gmail.com - fablo.calcarella@ingpec.eu

Direttore Tecnico: Dott. Ing. Fabio CALCARELLA



wpd MURO s.r.l.

Viale Aventino, 102 - 00153 Roma
C.F. e P.I. 15443431000
tel. +39 06 960 353-00



Data	Motivo della revisione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:
Marzo 2020	Prima emissione	STC S.r.l.	FC	wpd MURO s.r.l.

Sommario

1. PREMESSA.....	2
2. AEROGENERATORE DI PROGETTO	2
3. RISCHIO DI ROTTURA ACCIDENTALE	2
4. GITTATA-ANALISI TEORICA	4
5. STUDIO VESTAS	5
6. GITTATA-ANALISI TEORICA E MODELLO MATEMATICO	8
7. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO PALA INTERA	13
8. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO FRAMMENTO 10 m.....	15
9. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO FRAMMENTO 5 m.....	17
10. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO FRAMMENTO 2 m	19
11. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO FRAMMENTO 1 m	21
12. CONCLUSIONI	23

1. PREMESSA

La presente relazione è parte della documentazione di progetto che la società wpdMURO S.r.l. ha elaborato per la realizzazione e l'esercizio di un impianto eolico di potenza installata pari a 90 MW, costituito da 15 aerogeneratori nei comuni di Mesagne, Brindisi, San Donaci, San Pancrazio salentino in Provincia di Brindisi.

2. AEROGENERATORE DI PROGETTO

L'impianto sarà costituito da 15 unità di produzione. Ciascun aerogeneratore sarà tripala ad asse orizzontale costituito da una torre tubolare metallica a tronco di cono alta 165 m e con un diametro di base di circa 5,5 m. In cima alla torre troverà alloggio la navicella cui è collegato il rotore di diametro pari a 170 m, per un'altezza massima complessiva del sistema torre-pale di 250 m (TIP). La velocità del rotore massima è di 11 giri/minuto.

3. RISCHIO DI ROTTURA ACCIDENTALE

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse. Tuttavia, al fine della sicurezza, la stima della gittata massima di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico.

Il rischio è considerato in questo contesto come combinazione di due fattori:

- la probabilità che possa accadere un determinato evento;
- la probabilità che tale evento abbia conseguenze sfavorevoli.

Durante il funzionamento dell'impianto, il più grande rischio è dovuto alla caduta di oggetti dall'alto, queste cadute possono essere dovute:

- a pezzi di ghiaccio formatisi sulla pala;
- a rottura accidentale di pezzi meccanici in rotazione.

Per ciò che concerne la prima tipologia di evento, vista la latitudine dell'area di progetto e le caratteristiche climatiche, la sua probabilità si può considerare trascurabile.

Per ciò che riguarda la seconda tipologia è bene evidenziare che, potrebbe accadere, in linea teorica che sia abbia il distacco dell'intera pala o il distacco di un frammento.

Il collegamento rigido tra le pale ed il mozzo limita sino a quasi ad annullare il rischio di distacco di una pala. Con riferimento ai materiali utilizzati per il collegamento delle pale al centro del rotore osserviamo che i bulloni e i dadi utilizzati per l'assemblaggio dei tronchi di torre saranno ad alta resistenza di classe 10.9 (i bulloni) e classe 10 (i dadi) secondo la classificazione della Norma UNI EN ISO 898-1:2001.

Come si evince dalla tabella 11.3.XII della stessa Norma, sotto riportata, si tratta delle classi di più elevata resistenza oggi riconosciute.

	Normali			Ad alta resistenza	
Vite	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
Dado	4	5	6	8	10

Per quanto concerne le modalità di montaggio osserviamo che il serraggio di viti e bulloni avviene con chiave dinamometrica, ovvero con chiave che effettua il serraggio. Ciò significa che il serraggio avviene al giusto valore di coppia, cioè attraverso una forza calibrata al di sotto della soglia limite, oltre la quale si ha un effetto torcente che danneggia la filettatura della vite e del bullone. In termini più tecnici il controllo avviene misurando la coppia di serraggio, ovvero la forza espressa in Newton Metro (NW) con cui i due elementi vengono stretti.

In pratica l'uso della chiave dinamometrica assicura che il serraggio sia effettuato correttamente (al giusto valore di coppia) senza danneggiare viti e bulloni (senza effetto torcente). E' evidente che tali modalità costituiscono condizione per serraggio perfetto senza che l'accoppiamento di due parti avvenga in modo soggettivo ed affidato alla "sensazione" dell'operatore, diminuendo sensibilmente il rischio di rotture e quindi di incidenti. Un serraggio mal effettuato potrebbe essere causa di allentamento o rottura dell'accoppiamento.

Facciamo altresì presente che la pratica di montaggio, non solo prevede l'utilizzo della chiave dinamometrica, ma anche che il serraggio (sempre con chiave dinamometrica) sia controllato due volte prima della messa in esercizio dell'aerogeneratore. Ciò significa che dopo il primo serraggio (tipicamente contrassegnato da un segno sul bullone o sulla testa della vite) ne seguano altri due peraltro effettuati da operatori sempre diversi.

In definitiva possiamo affermare che, in relazione a:

- Tipologia dei materiali utilizzati di qualità migliore presenti sul mercato
- La metodologia di montaggio
- I controlli effettuati dopo il montaggio

Il rischio di distacco di una pala costituisce un evento di probabilità pressoché nulla per aerogeneratori di grossa taglia quali quelli in progetto.

Per quanto attiene il distacco di un frammento di pala osserviamo che le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro e carbonio rinforzato con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche: l'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi ad annullare la probabilità di

distacco di parti meccaniche in rotazione: anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono di fatto unita in un unico pezzo (seppure gravemente danneggiato).

Infine sempre in relazione alle condizioni di sicurezza osserviamo quanto segue.

- gli aerogeneratori sono dotati di un sistema di supervisione e controllo pale. Il sistema di controllo è basato su un sistema multiprocessore, che gestisce automaticamente tutte le funzioni della turbina come l'avvio, l'arresto, la produzione, la disponibilità dei sottosistemi. Questo sistema consente anche il controllo a distanza dell'aerogeneratore. Il sistema di protezione è un sistema cablato completamente autonomo, capace di arrestare la turbina in qualunque situazione di emergenza, escludendo danni al sistema e mantenendo i carichi al di sotto dei limiti di progetto;
- gli aerogeneratori di grande taglia del tipo previsto in progetto, in considerazione anche del loro elevato valore commerciale, sono oggetto di programmi di manutenzione molto accurati che per quanto riguarda le pale è atto a verificare l'esistenza di piccole fratture, di cui se accertata la pericolosità determinano interventi di manutenzione ordinaria (riparazioni) o straordinaria (sostituzione del pezzo).

La statistica riporta fra le maggiori cause di danno quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare sarà protetto con parafulmini. In conformità a quanto previsto dalla norma CEI 81-1 la classe di protezione sarà quella più alta (Classe I). In termini probabilistici ciò significa un livello di protezione del 98% (il 2% di probabilità che a fulminazione avvenuta si abbiano danni al sistema).

Pertanto può affermarsi che la probabilità che si produca un danno al sistema con successivi incidenti è molto limitata se non addirittura nulla.

4. GITTATA-ANALISI TEORICA

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 "giavellotto" del frammento.

Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di un moto a giavellotto 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.

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.

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 (12,1 giri/min). 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.

5. STUDIO VESTAS

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 escludersi data la complessità aerodinamica della pala, il suo peso (oltre 8 t) 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 .

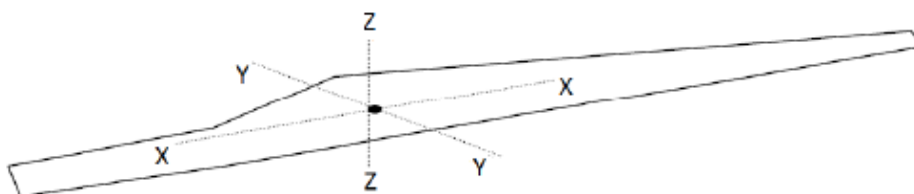


Fig.1 Rappresentazione degli assi di rotazione

La rotazione della pala intorno all'asse zz è causato 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.

Di questi parametri si tiene sostanzialmente conto nello studio eseguito dalla PB Power Ltd per conto della società Vestas Wind System "VESTAS V80 – Blade throw calculation under normal operating conditions" (2001), "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, velocità di rotazione 16,5 g/min), 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 un 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.

6. 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.

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

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:

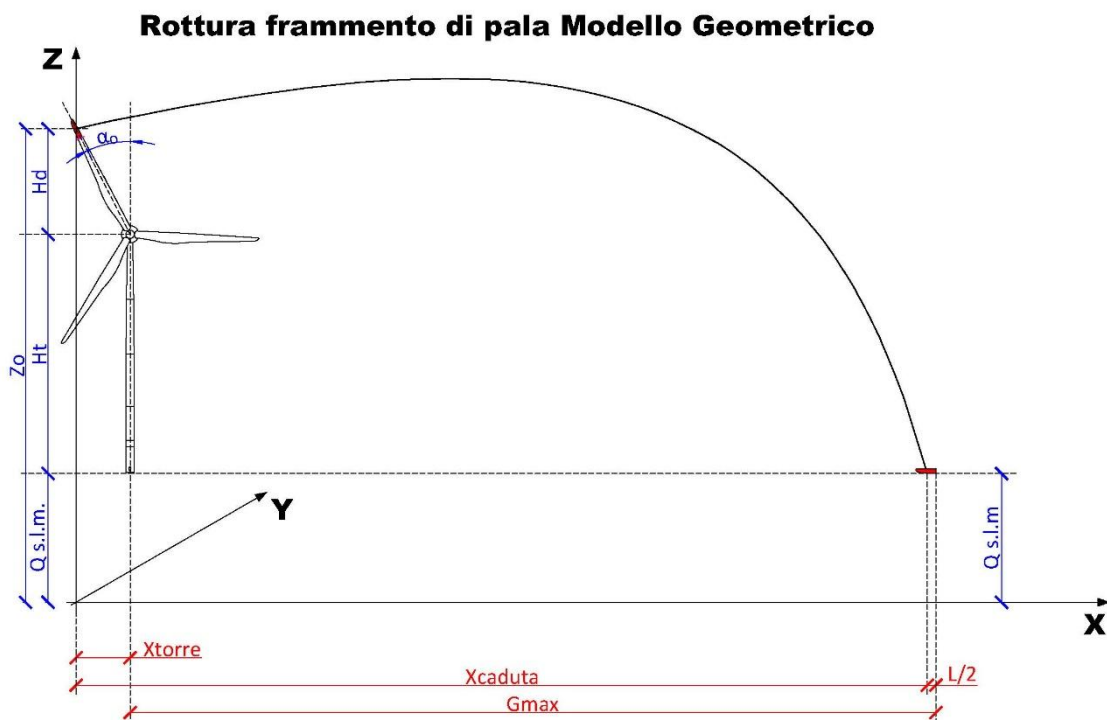
$$G_{\text{Max}} = \text{distanza (centro torre, punto di caduta)} + L/2 \text{ (nel caso del frammento di lunghezza } L)$$

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

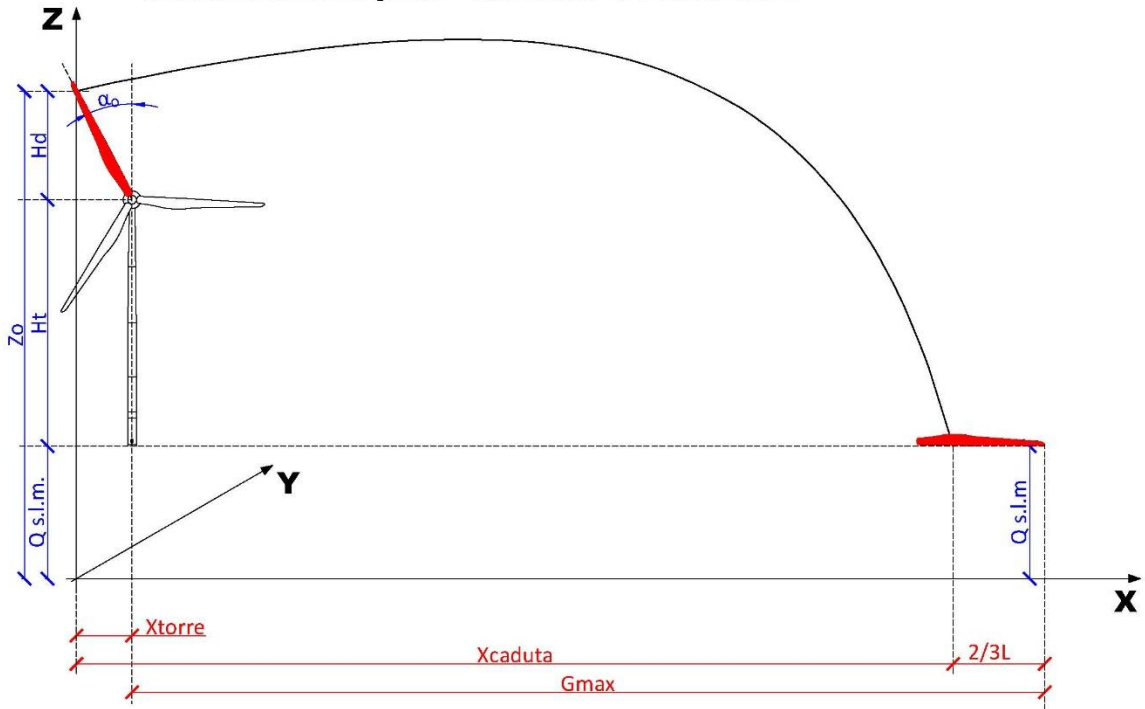
Una volta impostato e risolto il modello con riferimento al valore di inizializzazione di α_0 si è proceduto per tentativi, provando a variare α_0 , di un grado per volta, nella direzione in cui G_{Max} risultava aumentare e fino a che non si registrava un decremento, individuando in tal modo il valore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



7. 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 67 m circa, 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:

- $M = 24.600$ kg dato del costruttore Siemens Gamesa relativo al peso dell'intera pala
- Superficie efficace di resistenza al moto $A = 250$ mq
- Altezza mozzo $Q_t = 165$ m, diametro rotore 170 m, lunghezza pala 83,5 m, velocità di rotazione massima 11 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 250 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala (lunghezza 73,5 m, larghezza massima 4,5 m, altezza massima 3,4 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 $\alpha_0 = 13^\circ$.
- 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. $Q_{s.l.m.} = 67$ m, sulla base del valore medio rilevato in sito.

- Si è considerata la velocità massima del vento di 25 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

$$G_{Max} = 201,58 \text{ m}$$

Con tempo di permanenza in volo di 8 secondi circa.

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, 5 m, 2 m, 1 m.

8. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO FRAMMENTO 10 m

Nel caso di un frammento di lunghezza pari a 10 m, i parametri fisici e geometrici che si assumeranno saranno i seguenti:

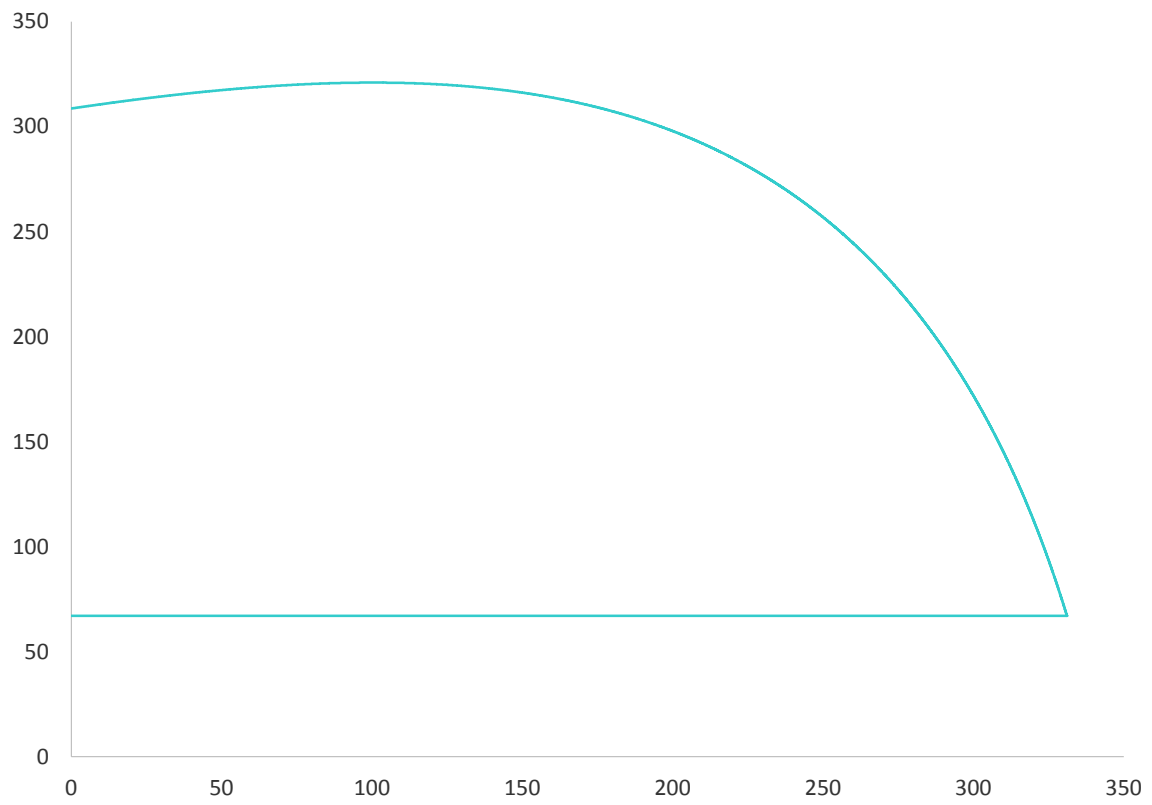
- $M = 1.500$ kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo
- Superficie efficace di resistenza al moto $A = 15$ mq
- Altezza mozzo $Q_t = 165$ m, diametro rotore 170 m, lunghezza pala 83,5 m, velocità di rotazione massima 11 g/min, che è la velocità massima consentita così come da specifiche del costruttore
- 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 16 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 $\alpha_0 = 12^\circ$.
- 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). $Q_{s.l.m.} = 67$ m, sulla base del valore medio rilevato in sito.
- Si è considerata la velocità massima del vento di 25 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

$$G_{Max} = 331,72 \text{ m}$$

Con tempo di permanenza in volo di 10,7 secondi circa.

Traiettoria con gittata massima - frammento L=10m



9. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO FRAMMENTO 5 m

Nel caso di un frammento di lunghezza pari a 5 m, i parametri fisici e geometrici che si assumeranno saranno i seguenti:

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

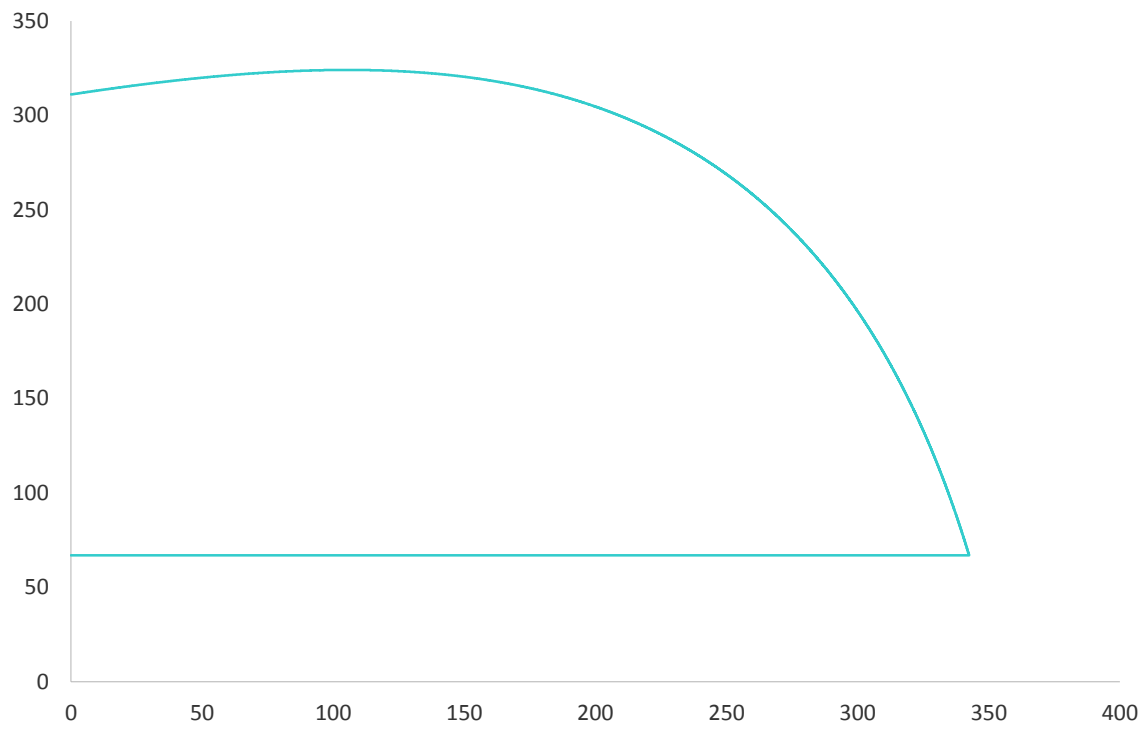
- $M = 620$ kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo
- Superficie efficace di resistenza al moto $A = 6,5$ mq
- Altezza mozzo $Q_t = 165$ m, diametro rotore 170 m, lunghezza pala 83,5 m, velocità di rotazione massima 11 g/min, che è la velocità massima consentita così come da specifiche del costruttore
- 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 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 $\alpha_0 = 12^\circ$.
- 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). $Q_{s.l.m.} = 67$ m, sulla base del valore medio rilevato in sito.
- Si è considerata la velocità massima del vento di 25 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

$$G_{Max} = 339,42 \text{ m}$$

Con tempo di permanenza in volo di 10,8 secondi circa.

Traiettoria con gittata massima - Frammento L=5 m



10. CALCOLO DELLA GITTATA – DISTACCO FRAMMENTO 2 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 si assumeranno saranno i seguenti:

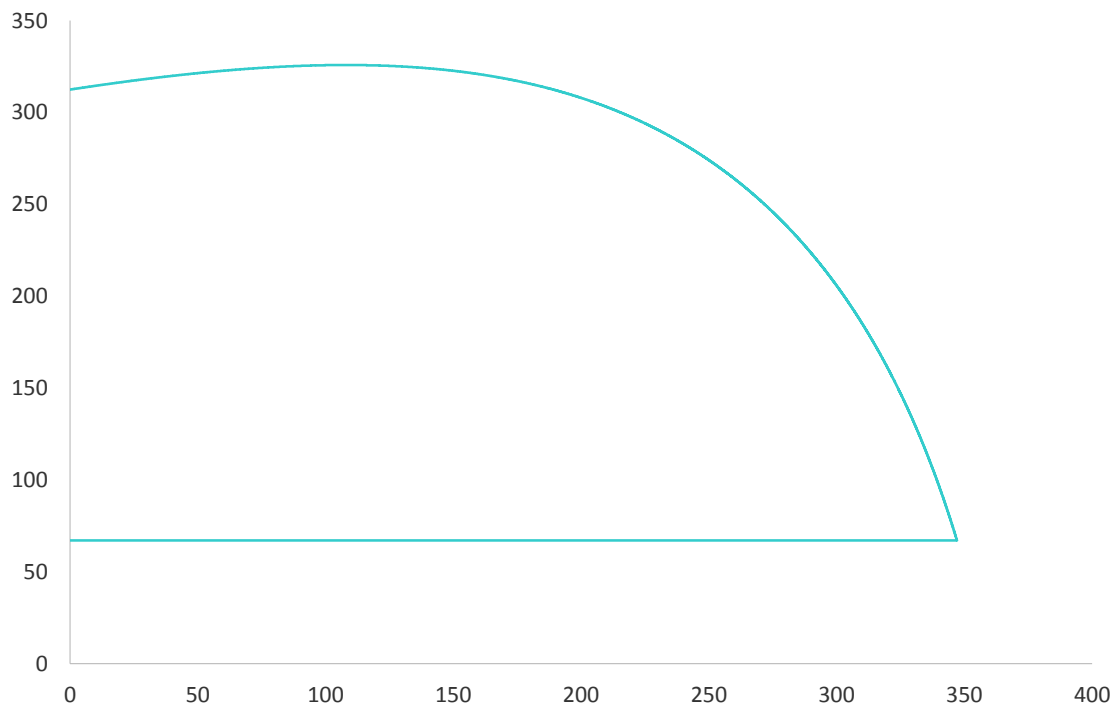
- $M = 240$ kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo
- Superficie efficace di resistenza al moto $A = 2,5$ mq
- Altezza mozzo $Q_t = 165$ m, diametro rotore 170 m, lunghezza pala 83,5 m, velocità di rotazione massima 11 g/min, che è la velocità massima consentita così come da specifiche del costruttore
- 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 $\alpha_0 = 12^\circ$.
- 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). $Q_{s.l.m.} = 67$ m, sulla base del valore medio rilevati in sito.
- Si è considerata la velocità massima del vento di 25 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

$$G_{Max} = 342,23 \text{ m (frammento } L=2 \text{ m)}$$

Con tempo di permanenza in volo di 10,9 secondi circa.

Traiettoria con gittata massima _ Frammento L=2m



11. 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 si assumeranno saranno i seguenti:

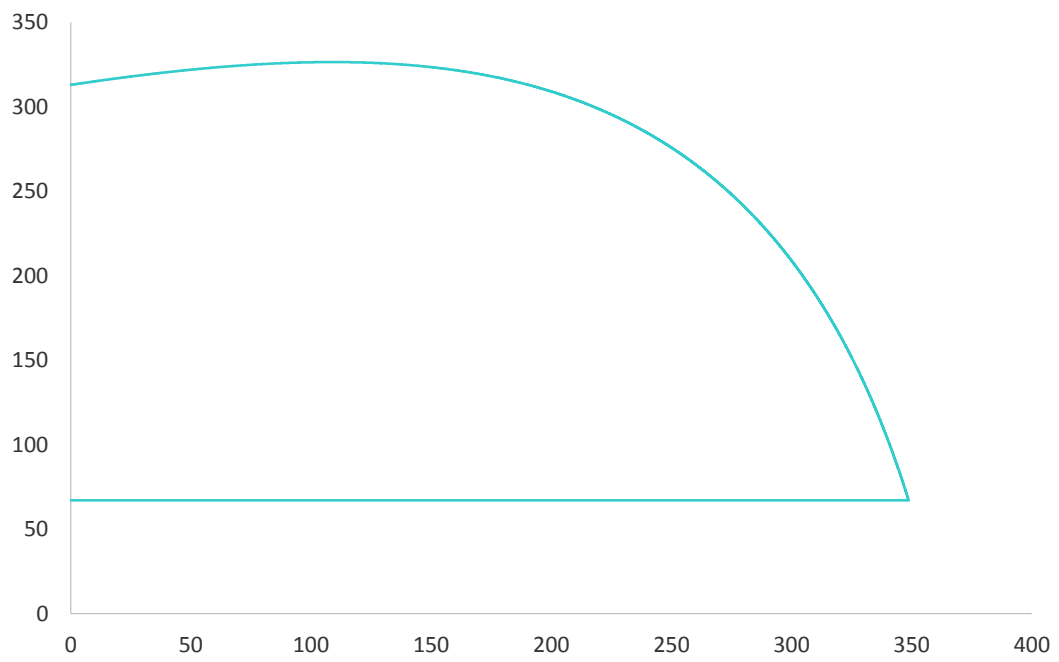
- $M = 125$ kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo
- Superficie efficace di resistenza al moto $A = 1,3$ mq
- Altezza mozzo $Q_t = 165$ m, diametro rotore 170 m, lunghezza pala 83,5 m, velocità di rotazione massima 11 g/min, che è la velocità massima consentita così come da specifiche del costruttore
- 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 $\alpha_0 = 12^\circ$.
- 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). $Q_{s.l.m.} = 67$ m, sulla base del valore medio rilevati in sito.
- Si è considerata la velocità massima del vento di 25 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

$$G_{Max} = 343,28 \text{ m (frammento } L=1 \text{ m)}$$

Con tempo di permanenza in volo di 10,9 secondi circa.

Traiettoria con gittata massima _ Frammento L=1m



12. 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:

$$\mathbf{G_{Max} = 201,58 m (pala intera)}$$

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:

$$\mathbf{G_{Max} = 331,72 m (Frammento L=10 m)}$$

$$\mathbf{G_{Max} = 339,42 m (Frammento L=5 m)}$$

$$\mathbf{G_{Max} = 342,25 m (Frammento L=2 m)}$$

$$\mathbf{G_{Max} = 343,28 m (Frammento L=1 m)}$$

Dai risultati è evidente che:

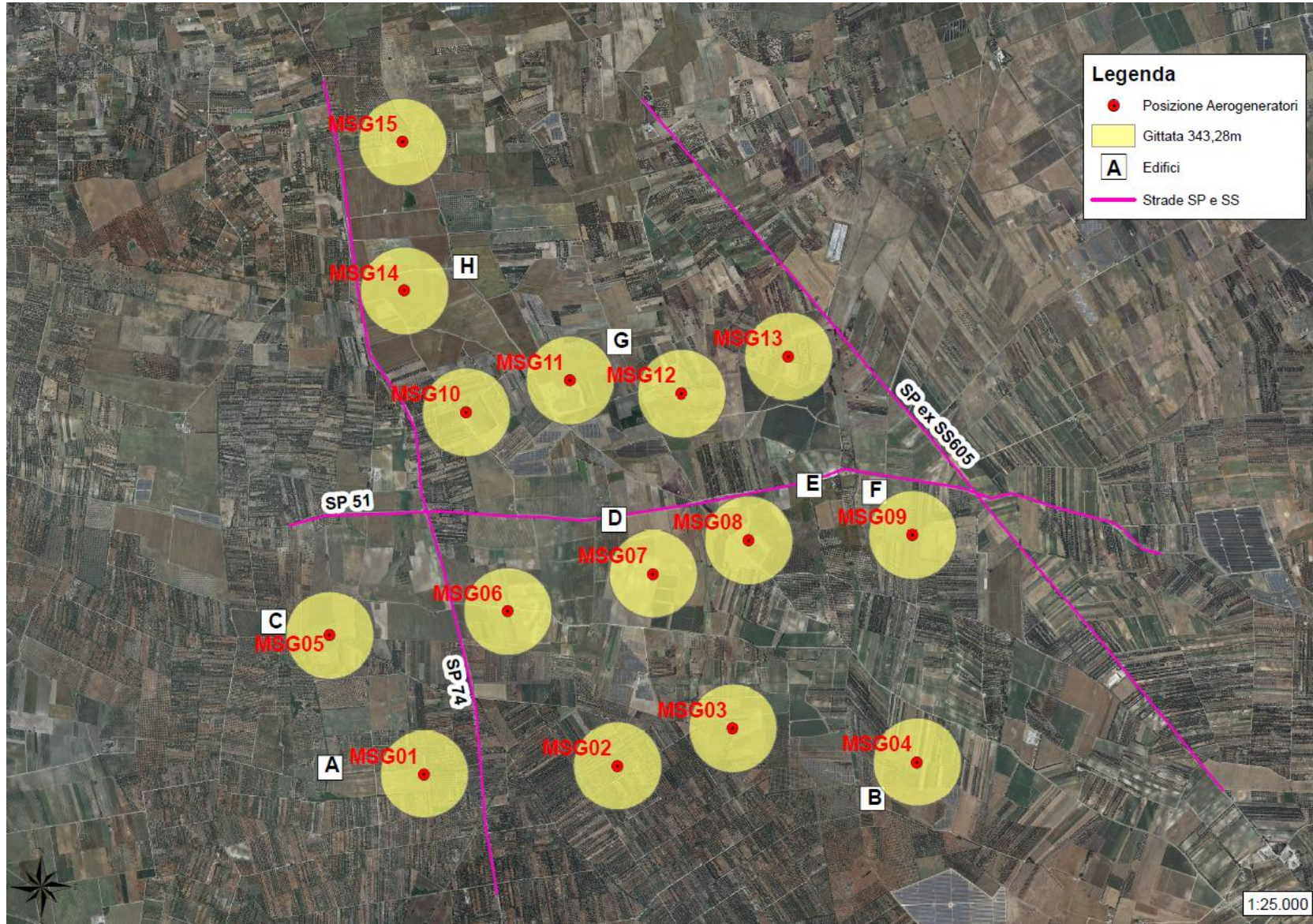
- 1) Nel caso dell'intera pala il notevole peso (24.600 kg), incide notevolmente sulla lunghezza della traiettoria, oltre che sul tempo di volo.
- 2) I frammenti quanto più piccoli (e quindi leggeri) sono, tanto maggiore è il valore della gittata
- 3) I valori della gittata sono tutti dipendenti dall'angolo 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 (frammento di 1 m) la gittata si mantiene al di sotto dei 350 m.**

Facciamo notare a tal proposito che gli aerogeneratori sono posizionati ad una distanza minima di 370 m, da strade provinciali, 600 m da edifici abitati e 450 m da edifici solo potenzialmente abitabili poiché attualmente in stato di decennale abbandono.

E' importante infine rimarcare che il costruttore di aerogeneratori 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). E' peraltro evidente che attesi i notevoli interessi economici in gioco la manutenzione ordinaria, straordinaria e predittiva degli aerogeneratori sia effettuata puntualmente dalla proprietà dell'impianto. La rottura di una pala significherebbe un fermo macchina di almeno un paio di mesi con costi sicuramente più elevati che quelli che si sostengono con la normale manutenzione ordinaria, ed anche una eventuale sostituzione di una pala "consigliata" da una manutenzione predittiva. In definitiva non vi è dubbio che il distacco di una pala è un evento con probabilità molto bassa, praticamente nulla.

Il distacco accidentale di un frammento appare un evento ancora meno probabile in considerazione delle modalità costruttive delle pale stesse. Si tratta di pezzi unici realizzati con resine e fibre con tessiture che assicurano un'alta resistenza meccanica e che anche nel caso peggiore (pensiamo alla fulminazione) porterebbero la pala a piegarsi, senza spezzarsi e quindi senza generare distacco di frammenti.

Lecce, febbraio 2020



Gittata massima – Distanza da Strade Provinciali ed Edifici Abitati/ Abitabili