



REGIONE  
SARDEGNA



COMUNE DI  
PUTIFIGARI



COMUNE DI  
ITTIRI



PROVINCIA DI  
SASSARI

## PROGETTO DEFINITIVO

Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica "Monte Rosso" con potenza di immissione in rete pari a 92.4 MW e relative opere connesse da realizzarsi nei comuni di Putifigari ed Ittiri (SS)

Titolo elaborato

### Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti

Codice elaborato

**F0529AR05A**

Scala

-

Riproduzione o consegna a terzi solo dietro specifica autorizzazione.

### Progettazione



#### F4 ingegneria srl

Via Di Giura - Centro direzionale, 85100 Potenza  
Tel: +39 0971 1944797 - Fax: +39 0971 55452  
www.f4ingegneria.it - f4ingegneria@pec.it

Il Direttore Tecnico  
(ing. Giovanni Di Santo)



Gruppo di lavoro

Dott. For. Luigi ZUCCARO  
Ing. Giuseppe MANZI  
Ing. Alessandro Carmine DE PAOLA  
Ing. Flavio TRIANI  
Ing. Gerardo SCAVONE  
Ing. Monica COIRO  
Ing. Simone LOTITO  
Arch. Gaia TELESCA



Società certificata secondo le norme UNI-EN ISO 9001:2015 e UNI-EN ISO 14001:2015 per l'erogazione di servizi di ingegneria nei settori: civile, idraulica, acustica, energia, ambiente (settore IAF: 34).

Consulenze specialistiche

### Committente



#### wpd Monte Rosso S.r.l.

Viale Regina Margherita 33, 09124 Cagliari (CA)

Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
Febbraio 2023	Prima emissione	ADP	GMA	GDS

## Sommario

<b>1</b>	<b>Premessa</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Gittata, analisi teorica e modello matematico</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Calcolo della gittata - distacco pala intera</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Calcolo della gittata – distacco frammento di 10 m</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Calcolo della gittata – distacco frammento 5 m</b>	<b>12</b>

# 1 Premessa

---

L'intervento proposto consiste nella realizzazione di un nuovo parco eolico, denominato "Monte Rosso", localizzato nei territori comunali di Putifigari ed Ittiri, in provincia di Sassari. L'impianto sarà composto da n. 14 aerogeneratori della potenza nominale di 6.6 MW ciascuno, con la potenza complessiva in immissione di 92.4 MW, STMG Terna ID 202100120. Le relative opere di connessione saranno ubicate nei Comuni di Putifigari ed Ittiri (SS).

Il calcolo della gittata massima è stato effettuato 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 di sicurezza, ovvero producono risultati con approssimazione in eccesso della gittata massima in caso di rottura di elementi rotanti, poiché il calcolo è 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 articolata. È evidente però che si tratta di un moto rotazionale complesso in quanto il corpo, quando inizia il suo moto libero, continua 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 è dissipata nel moto rotazionale che genera turbolenze. Di queste dissipazioni non si è tenuto conto nel calcolo che, pertanto, è prudenziale.

Una volta che il corpo si è distaccato le forze inerziali agenti saranno la forza di gravità e le forze viscosive dovute alla resistenza prodotta dall'aria.

L'aerogeneratore preso come riferimento per la presente verifica e previsto in progetto è del tipo Siemens Gamesa SG-170 6.6 MW-HH165 o similare.

La velocità del rotore è variabile in relazione all'intensità del vento, ad ogni modo il calcolo sarà effettuato con riferimento alla velocità massima di 10.60 giri/min. Il peso della singola pala è di 25.0 tonnellate. Tali dati sono direttamente forniti dal produttore (specifiche tecniche aerogeneratore).

## 2 Gittata, analisi teorica e modello matematico

Le assunzioni del modello impiegato per le valutazioni riportate nella presente analisi sono le seguenti:

- a. Si fa riferimento al baricentro del corpo (sulla base di forma e dimensione opportunamente ipotizzate) e si applicano ad esso le equazioni del moto.
- b. 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.
- c. Si determina l'angolo  $\alpha_0$  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.
- d. 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).
- e. Si ipotizza la temperatura ambientale di 40°C, che minimizza alle condizioni d'esercizio la densità atmosferica e quindi l'attrito viscoso.
- f. 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:

1.  $\rho_{aria}$  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 alle massime altezze raggiunte dal sistema torre tubolare + rotore;
  2.  $C_d$  è il coefficiente di attrito, fortemente dipendente dalle caratteristiche geometriche della pala. Sulla base di dati riportati in letteratura tale valore è stato assunto pari a 1;
  3.  $A$  è la superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria;
  4.  $V_{xz}$  è il modulo della proiezione del vettore velocità del corpo sul piano XZ misurata con riferimento al baricentro del corpo stesso.
- g. 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:

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

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

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

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

Dove:

5.  $\alpha$  rappresenta l'arcotangente del rapporto  $V_z/V_x$  e cambia da istante a istante durante il moto libero di caduta;
6.  $w$  è il modulo della velocità del vento, supposta ortogonale al piano XZ e costante per tutta la durata del moto;
7.  $V_y$  è il modulo della componente della velocità del corpo avente la stessa direzione del vento;
8.  $g$  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);
- $\alpha_0$  viene inizializzato al valore arbitrario di  $20^\circ$ , 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 precisato nel seguito);
- 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 si suppone essere ortogonale al vento stesso;

Dalle precedenti dipendono le seguenti ulteriori condizioni:

- quota di distacco  $Z_0$ ;
- densità atmosferica  $\rho_{aria}$  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 permette 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 deve 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.

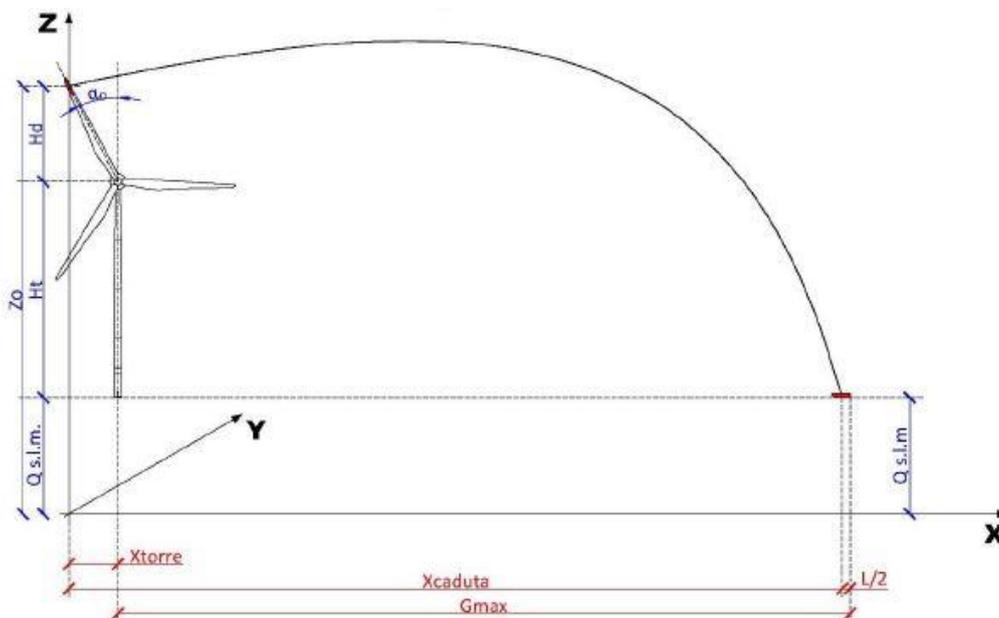
Nel punto di caduta si deve tenere poi in conto della lunghezza del frammento o della pala. Pertanto, in definitiva la gittata massima, sarà uguale a:

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

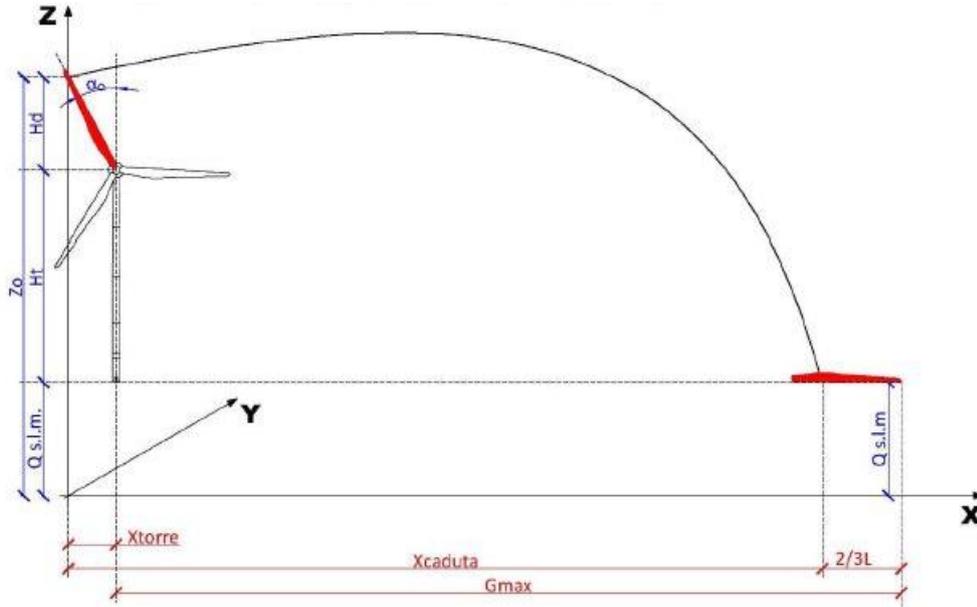
$$G_{Max} = \text{distanza (centro torre, punto di caduta)} + 2/3L \text{ (nel caso di pala intera di lunghezza } L)$$

Una volta impostato e risolto il modello con riferimento al valore di inizializzazione di  $\alpha_0$  si è proceduto per tentativi, provando a variare  $\alpha_0$ , di un grado alla volta, valutando l'incremento o meno di  $G_{Max}$  e fino a quando non si registra un decremento, individuando in tal modo il valore di  $\alpha_0$  che massimizza  $G_{Max}$ .

Nella figura seguente è riportata schematicamente la geometria del sistema considerato, nel caso di distacco del frammento di pala o della pala intera. È importante notare che trattandosi di un'area sub-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 fosse posizionato sulla cresta di una collina.



**Figura 1: Modello Geometrico della rottura di un frammento di pala**

**Figura 2: Modello Geometrico della rottura della pala intera**

### 3 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, dal seguente sistema di equazioni:

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

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, 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 è 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:

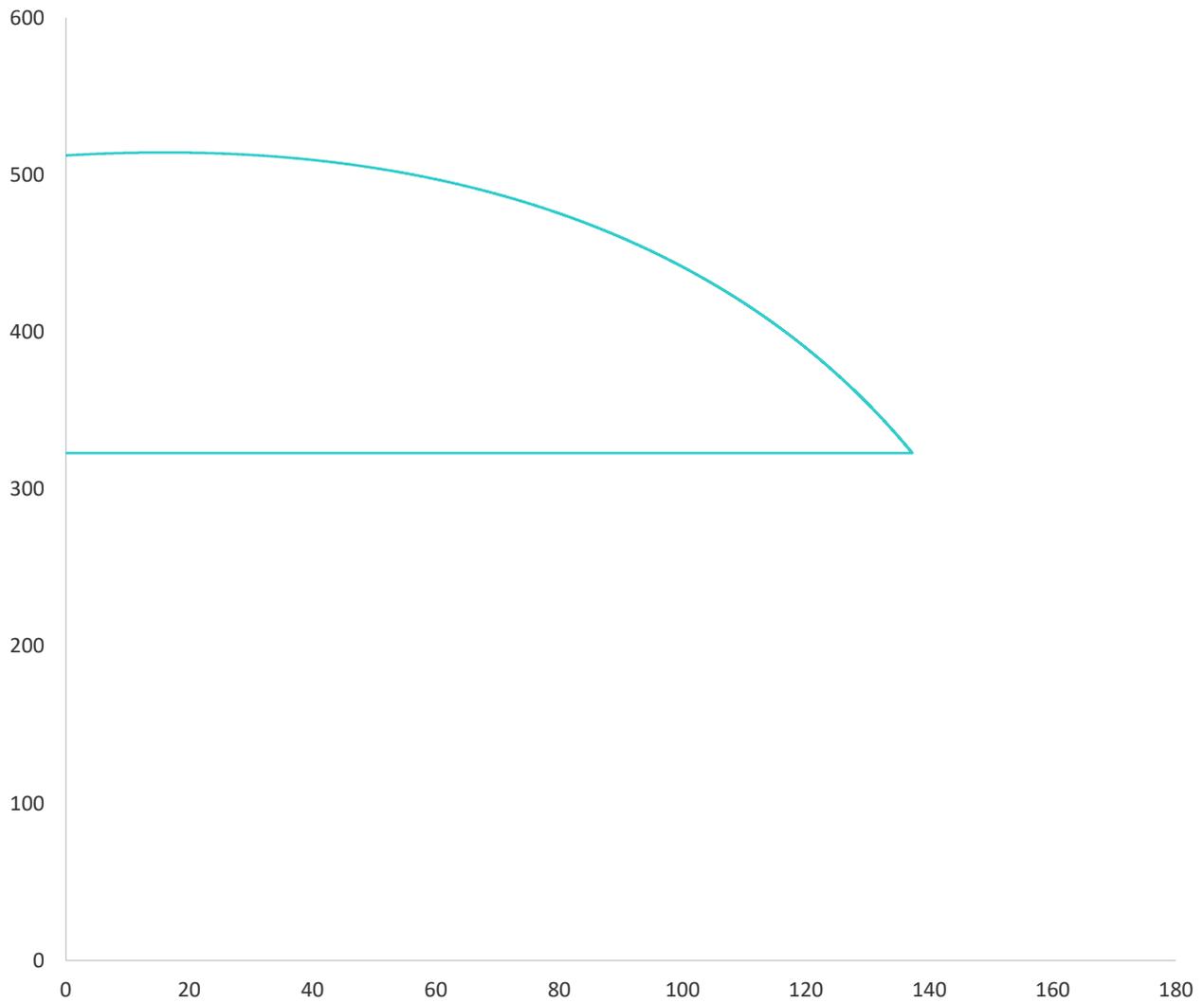
$$G_{Max} = X_{caduta} - X_{torre} + 2/3L \text{ (pala di lunghezza } L)$$

Nel caso di distacco dell'intera pala i parametri fisici e geometrici assumono i seguenti valori:

- $M = 25000$  kg fornito dal produttore per l'intera pala;
- Altezza mozzo  $H_{hub} = 165$  m, diametro rotore 170 m, lunghezza pala 83.5 m, velocità di rotazione 10.60 giri/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore);
- 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  $250 \text{ m}^2$  sulla base delle caratteristiche geometriche della pala (si è ipotizzata un'altezza media di 2.95 m);
- Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo  $\alpha_0$  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. = 331 m, altezza media del terreno sul livello del mare nel punto di installazione degli aerogeneratori;
- 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  $40^\circ\text{C}$  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  $G_{Max} = 198.21 \text{ m}$  con tempo di permanenza in volo di circa 7.9 secondi circa. Nel grafico la traiettoria del moto che, ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

### Traiettoria con gittata massima



**Figura 3: Traiettoria con gittata massima – pala intera**

## 4 Calcolo della gittata – distacco frammento di 10 m

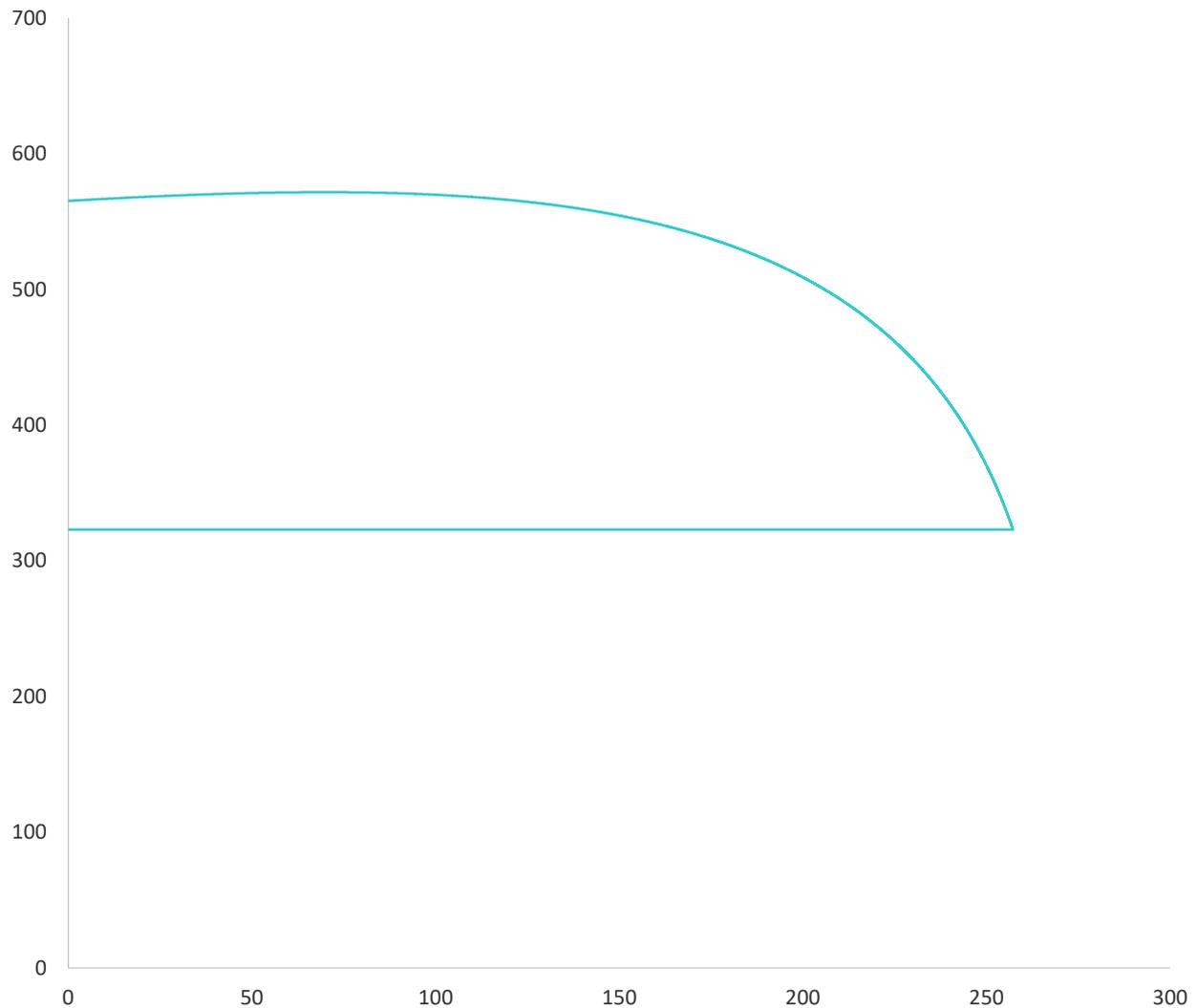
Come detto in precedenza, il distacco di un frammento di pala è da considerarsi un evento pressoché impossibile di seguito si riporta il valore della gittata massima come soluzione dell'equazione differenziale richiamata nel paragrafo precedente, nel caso di un frammento di lunghezza pari a 10 m.

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

- **M**= 926 kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo
- Altezza mozzo **H<sub>hub</sub>**= 165 m, diametro rotore 170 m, lunghezza pala 83.5 m, lunghezza frammento 10 m, velocità di rotazione 10.60 g/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore).
- La posizione del baricentro del frammento a 1/2 della sua lunghezza.
- **C<sub>d</sub>** = 1, sulla base di dati riportati in letteratura
- **A** = superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, si assume pari a 15 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  $\alpha_0$  a cui avviene il distacco. Nel caso in esame il risultato è stato  $\alpha_0 = 9^\circ$ .
- 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. = 331 m, altezza media del terreno sul livello del mare nel punto di installazione degli aerogeneratori.
- 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<sub>Max</sub> = 274.59 m** con tempo di permanenza in volo di 10.89 secondi circa. Nel grafico la traiettoria del moto che, ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

### Traiettoria con gittata massima - frammento L=10m



**Figura 4: Traiettoria con gittata massima – frammento L=10m**

## 5 Calcolo della gittata – distacco frammento 5 m

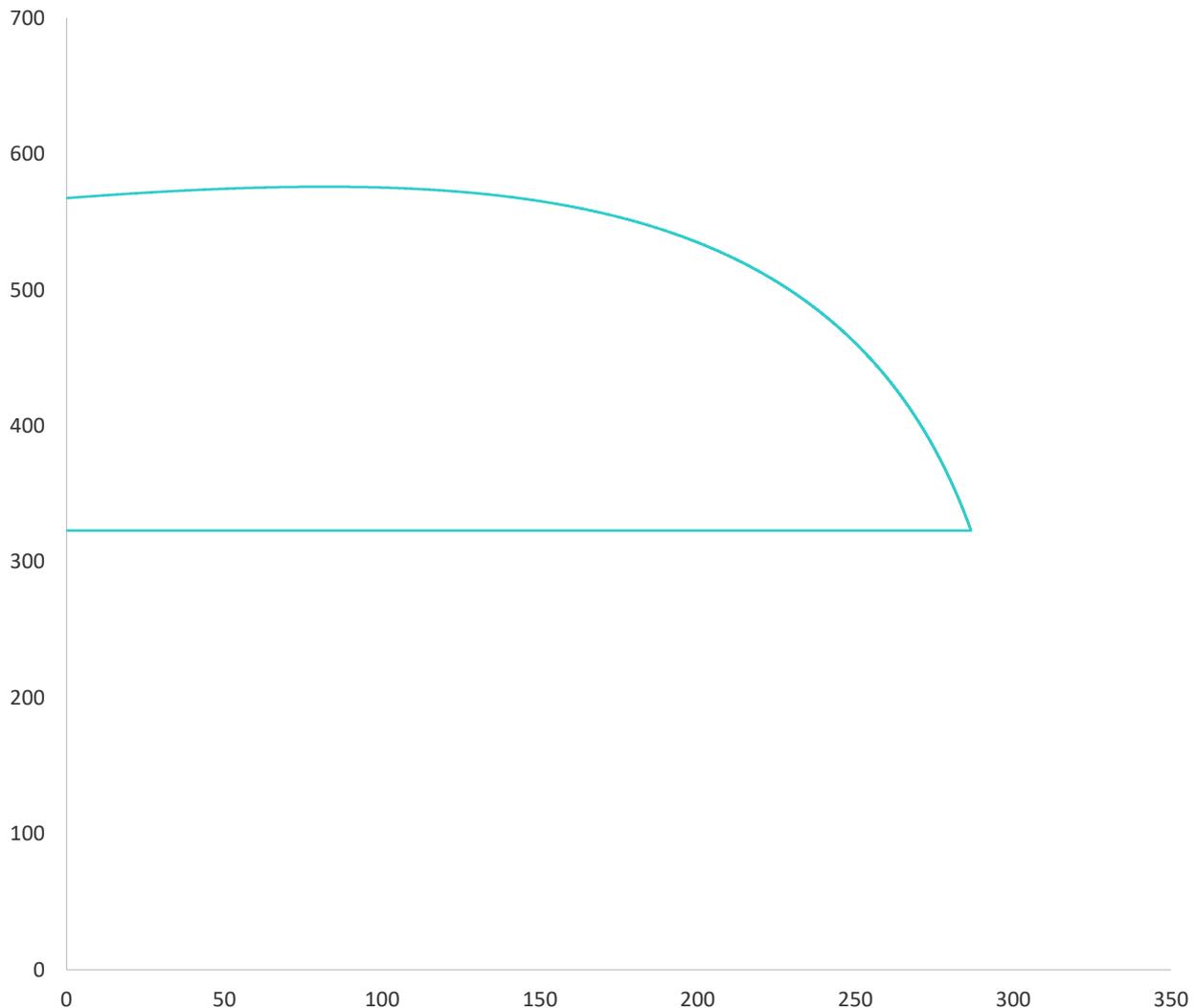
Come detto in precedenza, il distacco di un frammento di pala è da considerarsi un evento pressoché impossibile di seguito si riporta il valore della gittata massima come soluzione dell'equazione differenziale richiamata nel paragrafo precedente, nel caso di un frammento di lunghezza pari a 5 m.

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

- $M = 463$  kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo
- Altezza mozzo  $H_{hub} = 165$  m, diametro rotore 170 m, lunghezza pala 83.5 m, lunghezza frammento 5 m, velocità di rotazione 10.6 g/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore).
- La posizione del baricentro del frammento a 1/2 della sua lunghezza.
- $C_d = 1$ , sulla base di dati riportati in letteratura
- $A$  = superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, si assume pari a 10 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  $\alpha_0$  a cui avviene il distacco. Nel caso in esame il risultato è stato  $\alpha_0 = 10^\circ$ .
- 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. = 331 m, altezza media del terreno sul livello del mare nel punto di installazione degli aerogeneratori.
- 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  $G_{Max} = 293.99$  m con tempo di permanenza in volo di 10.87 secondi circa. Nel grafico la traiettoria del moto che, ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

### Traiettoria con gittata massima - Frammento L=5 m



**Figura 5: Traiettoria con gittata massima – frammento L=5m**

In base ai risultati ottenuti, risolvendo le equazioni del modello per tre casistiche specifiche, la gittata massima si raggiunge per un frammento di lunghezza pari a 5 m.

In base ai risultati si può evincere che:

- Nel caso dell'intera pala il notevole peso incide notevolmente sulla lunghezza della traiettoria, oltre che sul tempo di volo.
- La gittata dipende dal peso del frammento e dalla sua superficie efficace di resistenza al moto. Non è detto che un frammento più piccolo abbia una gittata maggiore. Il caso peggiore è dato dal frammento di lunghezza pari a 5 m per il quale la gittata massima è di 293.99 m.

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