

Marzo 2022

## **NURRI WIND SRL**

**IMPIANTO EOLICO "NURRI"**

**Comune di Nurri (SU)**

### **RICHIESTA DI AUTORIZZAZIONE**

**UNICA - D.Lgs. 387/2003**

**CALCOLO      GITTATA      ELEMENTI  
ROTANTI**

#### **Progettista**

Ing. Laura Conti / Ordine Ing. Prov. Pavia n.1726

#### **Coordinamento**

Eleonora Lamanna

Riccardo Festante

#### **Codice elaborato**

2905-4787-NU\_AU\_R09\_Rev0\_Gittata Massima.docx

**Montano**



## Memorandum delle revisioni

Cod. Documento	Data	Tipo revisione	Redatto	Verificato	Approvato
2905-4787-NU_AU_R09_Rev0_Gittata Massima.docx	03/2022	Prima emissione	G.d.L.	E.Lamanna	L.Conti

## Gruppo di lavoro

Nome e cognome	Ruolo nel gruppo di lavoro	N° ordine
Laura Conti	Direttore Tecnico - Progettista	Ord. Ing. Prov. PV n. 1726
Eleonora Lamanna	Coordinamento Progettazione, Studio Ambientale, Studi Specialistici	
Riccardo Festante	Coordinamento Progettazione, Tecnico competente in acustica	ENTECA n. 3965
Carla Marcis	Ingegnere per l'Ambiente ed il Territorio, Tecnico competente in acustica	Ord. Ing. Prov. CA n. 6664 – Sez. A ENTECA n. 4200
Ali Basharзад	Progettazione civile e viabilità	Ord. Ing. Prov. PV n. 2301
Massimiliano Kovacs	Geologo - Progettazione Civile	Ord. Geologi Lombardia n. 1021
Massimo Busnelli	Geologo – Progettazione Civile	
Giuseppe Ferranti	Architetto – Progettazione Civile	Ord. Arch. Prov. Palermo – Sez. A Pianificatore Territoriale n. 6328
Fabio Lassini	Ingegnere Civile Ambientale – Progettazione Civile	Ord. Ing. Prov. MI n. A29719
Vincenzo Gionti	Ingegnere Civile Ambientale – Progettazione Civile	
Lia Buvoli	Biologa – Esperto GIS – Esperto Ambientale	
Lorenzo Griso	Esperto GIS - Esperto Ambientale Junior	
Sara Zucca	Architetto – Esperto GIS - Esperto Ambientale	
Andrea Mastio	Ingegnere per l'Ambiente e il Territorio - Esperto Ambientale Junior	

### Montana S.p.A.

Via Angelo Carlo Fumagalli 6, 20143 Milano

Tel. +39 02 54 11 81 73 | Fax +39 02 54 12 98 90

Milano (Sede Certificata ISO) | Brescia | Palermo | Cagliari | Roma

C. F. e P. IVA 10414270156

Cap. Soc. 600.000,00 €

[www.montanambiente.com](http://www.montanambiente.com)





Andrea Fronteddu	Ingegnere Elettrico – Progettazione Elettrica	Ord. Ing. Cagliari n. 8788 – Sez. A
Matthew Piscedda	Esperto in Discipline Elettriche	

**Montana S.p.A.**

Via Angelo Carlo Fumagalli 6, 20143 Milano

Tel. +39 02 54 11 81 73 | Fax +39 02 54 12 98 90

Milano (Sede Certificata ISO) | Brescia | Palermo | Cagliari | Roma

C. F. e P. IVA 10414270156

Cap. Soc. 600.000,00 €

[www.montanambiente.com](http://www.montanambiente.com)





## INDICE

1.	PREMESSA.....	5
1.1	SPECIFICHE TECNICHE .....	5
2.	DISTACCO DI UNA DELLE PALE DAL ROTORE.....	6
3.	ROTTURA DELL’ESTREMITÀ DI UNA PALA .....	7
4.	CALCOLO DELLA GITTATA .....	8
4.1	GEOMETRIA DEL PROBLEMA E CALCOLO DELLA GITTATA.....	9
5.	CONCLUSIONI.....	12

## 1. PREMESSA

La presente relazione si pone come obiettivo lo studio della gittata massima, in caso di rottura accidentale, degli elementi rotanti della turbina Vestas V150-4.2 MW, corrispondente al modello di aerogeneratore previsto per la realizzazione di un nuovo impianto eolico della potenza di 29,4 MW da installarsi interamente nel comune di Nurri in provincia di Cagliari.

### 1.1 SPECIFICHE TECNICHE

L'aerogeneratore Vestas V150-4.2 MW è dotato di un duplice sistema di regolazione proprietario (OptiSpeed e OptiTip) che, agendo abbinatamente sulla velocità di rotazione e sul passo delle pale, consente di operare sempre ai valori ottimali per le condizioni correnti del vento. Il diametro del rotore, il cui asse di rotazione si trova a 125 m dal suolo, è pari a 150 m.

La velocità del vento per cui si raggiunge la produzione nominale è 12 m/s con una velocità massima di rotazione di 12 rotazioni per minuto. La velocità massima del vento oltre la quale il rotore si ferma (velocità di cut-out) è 24,5 m/s.

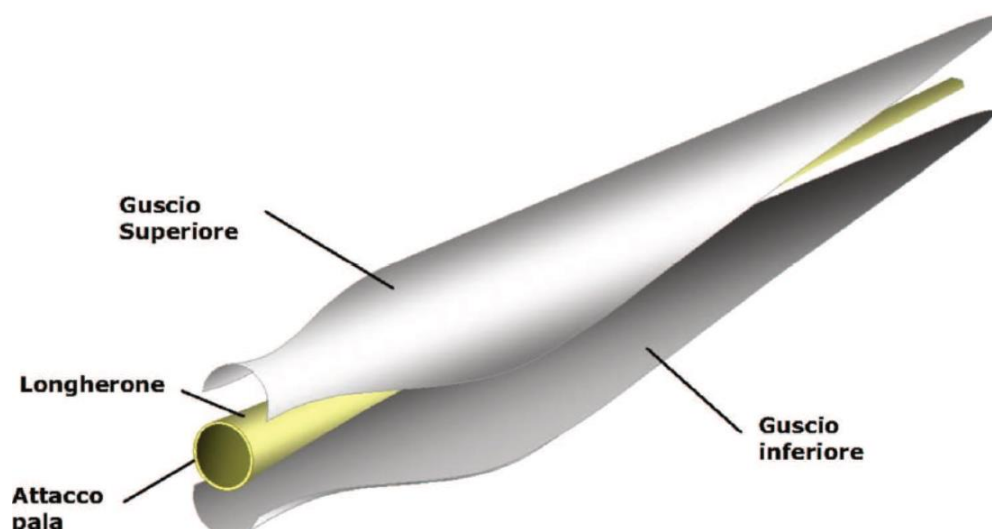
*Tabella 1.1: Caratteristiche generali della turbina V150-4.2 MW*

DESCRIZIONE GENERALE AEROGENERATORE VESTAS V150 – 4,2 MW	
DATI DI FUNZIONAMENTO	
Potenza nominale	4,2 MW
Velocità minima del vento	3 m/s
Velocità massima del vento	24,5 m/s
ROTORE	
Diametro del rotore	150 m
Area spazzata	17671 mq
Velocità angolare massima	12 RPM
PALA	
lunghezza	73,66 m
n. di pale	3

## 2. DISTACCO DI UNA DELLE PALE DAL ROTORE

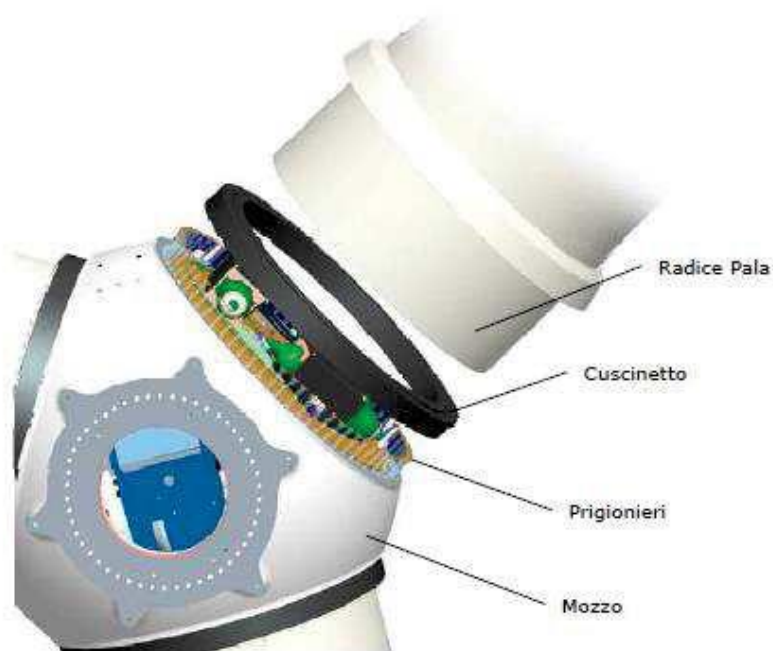
Questo tipo di incidente, che comporta il distacco di una pala completa dal rotore dell'aerogeneratore, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala e il mozzo.

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



*Figura 2.1: Schema strutturale di una pala eolica*

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



*Figura 2.2: Schema strutturale di una pala eolica*



### **3. ROTTURA DELL’ESTREMITÀ DI UNA PALA**

La rottura dell’estremità della pala si manifesta quasi sempre in concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica. Tutte le pale prodotte dalla Vestas sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine costituito da recettori metallici posti all’estremità di pala e lungo l’apertura della pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale.

In qualche caso, in cui la corrente di un fulmine ecceda i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all’estremità di pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala.

Eventuali residui o frammenti di guscio dovuti ad un evento ceraunico hanno dimensioni e pesi così esigui da non permettere valutazioni circa eventuali traiettorie e gittate. Queste sono comunque determinate quasi esclusivamente dal trasporto degli stessi ad opera del vento.

Dalle note operative esposte si può concludere che ha senso effettuare un calcolo di gittata della pala intera in quanto esiste un punto di discontinuità, ossia l’attacco bullonato che unisce la pala al mozzo, ed esiste un’ipotesi, seppur remota, sulla possibilità di cedimento di tale attacco. È da escludere invece, considerate le caratteristiche meccaniche della pala l’effetto di distacco di una porzione della stessa, in quanto si tratta di una struttura monolitica con la trave di sostegno che rimane vincolata al mozzo attraverso un collegamento bullonato.

## 4. CALCOLO DELLA GITTATA

Qualora dovesse verificarsi il distacco della pala dal rotore, il moto della stessa può essere scomposto in un moto traslatorio del centro di massa e da un moto rotatorio intorno al centro stesso.

La determinazione delle forze agenti sulla pala al momento della rottura è estremamente complessa in quanto, oltre al moto rotatorio, sono da considerarsi anche le tensioni interne determinate dalla flessione della pala, la forza del vento non perfettamente ortogonale al piano del rotore e le sollecitazioni indotte dalla rotazione della navicella (yawing).

Inoltre, durante la fase di volo sarebbero da considerarsi anche i fenomeni resistivi dati dalla densità dell'aria e dalla portanza del profilo alare.

Per semplificare il problema rimanendo nelle condizioni conservative vengono fatte le seguenti ipotesi:

- a. moto irrotazionale: la pala non ruota intorno al proprio baricentro;
- b. forze resistenti nulle;
- c. forze inerziali: si considera solamente la forza di gravità.

Fatte tali ipotesi, la traiettoria dalla pala è una parabola dipendente dalle seguenti variabili:

1. velocità di lancio ( $V$ ): espressa come costante dalle caratteristiche dell'aerogeneratore;
2. Angolo sotteso dalla pala con il piano ( $\alpha$ );
3. Altezza di lancio ( $h$ ): funzione dell'altezza della torre e dell'angolo  $\alpha$ .

La gittata massima sarà quindi calcolata in funzione dell'angolo  $\alpha$  che ne massimizza l'effetto.

Tutte le considerazioni sono state svolte considerando una velocità di rotazione del rotore pari a 12,6 rpm (incluso un aumento della velocità nominale di rotazione pari al 5% per tener conto dei fenomeni transitori al momento del distacco).

Possiamo ritenere con buona approssimazione che il baricentro della pala ( $R$ ), date le caratteristiche geometriche della pala e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, sia posizionato a circa un terzo della lunghezza della pala stessa, corrispondente a 23,2 m dal centro di rotazione.

La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo  $\alpha$  e dalla velocità tangenziale  $V$  al momento del distacco.

Il calcolo della gittata massima delle pale eoliche può essere svolto mediante lo sviluppo di modelli matematici basati sulle formule classiche della cinematica di corpo rigido:

1. in moto piano (piano ortogonale all'asse del rotore nelle condizioni di esercizio al momento del distacco, ossia piano di appartenenza del vettore velocità tangenziale del baricentro della pala al momento del distacco),
2. in assenza di forzanti (moto inerziale), come ad esempio quelle generate dal vento (ritenute trascurabili nella zona di installazione degli aerogeneratori oggetto della relazione),
3. in assenza di variazioni altimetriche significative del campo di installazione (campo piano).

L'impiego di tali formule nelle ipotesi sopra descritte consente la stima, teorica e conservativa, della traiettoria delle pale a seguito di eventuali rotture alla radice. L'affinamento dei modelli matematici con opportune integrazioni, volte prevalentemente all'implementazione degli effetti che derivano dall'interazione pala-aria e/o direzione del vento differente rispetto a quella considerata in fase di progettazione e installazione degli aerogeneratori, consentirebbe di aumentare i margini di sicurezza salvaguardando ad ogni modo le aree circostanti.

In generale, la forza di attrito viscoso dipende, oltre che dalla velocità, anche dal fluido in cui l'oggetto si muove, dalla forma e dalle dimensioni dell'oggetto in movimento che inducono la formazione di





vortici nel fluido stesso. Finché le velocità sono ridotte, il flusso dell'aria intorno alla pala è laminare e la forza di attrito viscoso tra corpo in movimento e aria cresce in modo direttamente proporzionale alla sua velocità. Nella trattazione si trascura l'effetto portante del vento sulla traiettoria della pala distaccata.

Si trascura altresì l'eventualità che si verifichino nell'area di installazione fenomeni vorticosi. In ogni caso, eventuali forzanti generate dal vento, considerata la condizione normale di funzionamento dell'aerogeneratore, per la quale l'asse del rotore è costantemente allineato con la direzione del vento, devierebbero la traiettoria fuori dal piano ipotizzato del moto, riducendone la gittata massima.

Calcolo della Gittata di Pala Eolica per il modello VESTAS V150 – 4,2 MW

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

$$x'' = 0$$

$$y'' = -g$$

dove  $g = 9,1 \text{ m/s}^2$  è l'accelerazione di gravità. La legge del moto, soluzione di queste equazioni è

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

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

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

La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo  $T$  tale che  $y(T) = 0$ .

Dalla legge del moto si ottiene

$$T = v_y/g + 1/g \sqrt{v_y^2 + 2 y_0 g}$$

scartando la soluzione corrispondente a tempi negativi.

#### **4.1 GEOMETRIA DEL PROBLEMA E CALCOLO DELLA GITTATA**

Consideriamo il moto bidimensionale dell'elemento rotante, come il moto di un punto materiale concentrato nel baricentro, tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento.

Chiamiamo con  $n$  il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare.

Tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a  $2\pi$  radianti, per  $n$  giri avremo  $2\pi n$  radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare  $\omega$  del corpo in movimento.

Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

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

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato a circa un terzo della lunghezza della pala stessa, corrispondente a  $r_g = 23,2 \text{ m}$  dal centro di rotazione; essendo il diametro del rotore  $D = 150 \text{ m}$  ed il raggio di ciascuna pala  $R = 73,66 \text{ m}$

Per determinare la velocità del baricentro della pala basta moltiplicare la distanza del baricentro dal centro di rotazione per la velocità angolare.

A favore di sicurezza aumentiamo del 5% la velocità massima del rotore (12 giri/minuto) che considereremo nel calcolo e che verrà pertanto fissata pari a  $12 \cdot 1.05 = 12,6$  giri/minuto.

Per questa velocità angolare, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a

$$V_g = \omega r_g = 2\pi n/60 r_g = 30,61 \text{ m/sec}$$

La posizione e la velocità iniziale sono determinati, oltre che dalla velocità tangenziale appena calcolata, anche dall'angolo  $\vartheta$  della pala al momento del distacco.

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

$$x_0 = -r_g \cos(\vartheta)$$

$$y_0 = H + r_g \sin(\vartheta)$$

$$v_x = V_g \sin(\vartheta)$$

$$v_y = V_g \cos(\vartheta)$$

La gittata  $L$  è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo della pala; l'altezza  $H$  è l'altezza del mozzo della torre (125 m).

pertanto  $H = 125,00$  m.

Dalla legge del moto otteniamo:

$$L = x(T)$$

Sostituendo l'espressione per  $T$  ricavata sopra, otteniamo la gittata  $L$  in termini di  $V_g$  e di  $\vartheta$ :

$$L = -r_g \cos(\vartheta) + V_g \sin(\vartheta)/g [V_g \cos(\vartheta) + v (V_g^2 \cos^2(\vartheta) + 2(H + r_g \sin(\vartheta))g)]$$

Nella formula di  $L$  sopra riportata, si assumono i seguenti dati:

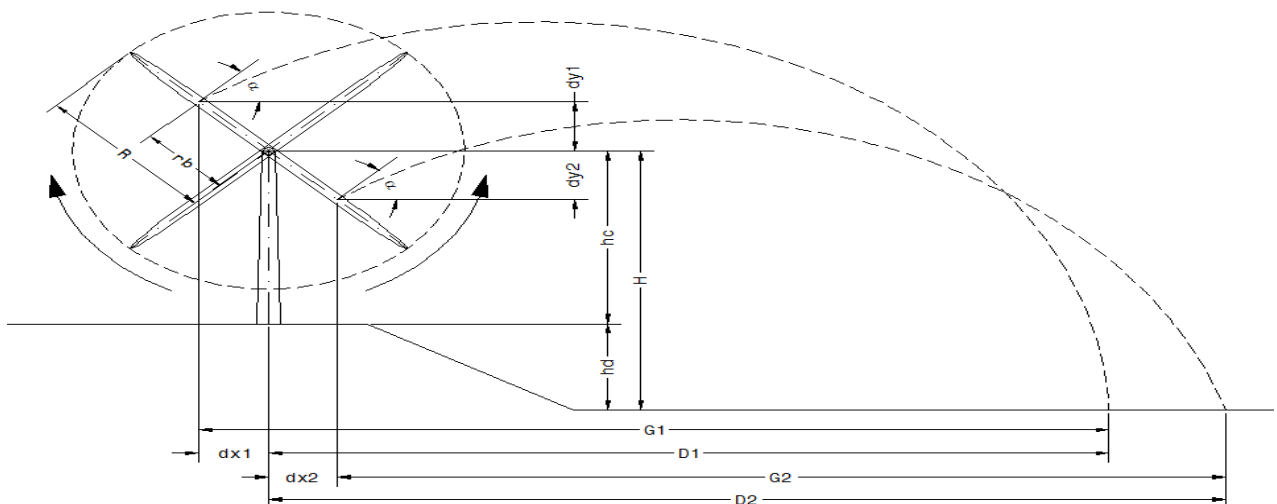
$$V_g = 30,61 \text{ m/s}$$

$$r_g = 23,20 \text{ m}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$H = 125 \text{ m}$$

Il valore massimo della gittata dipenderà dall'angolo  $\theta$ .



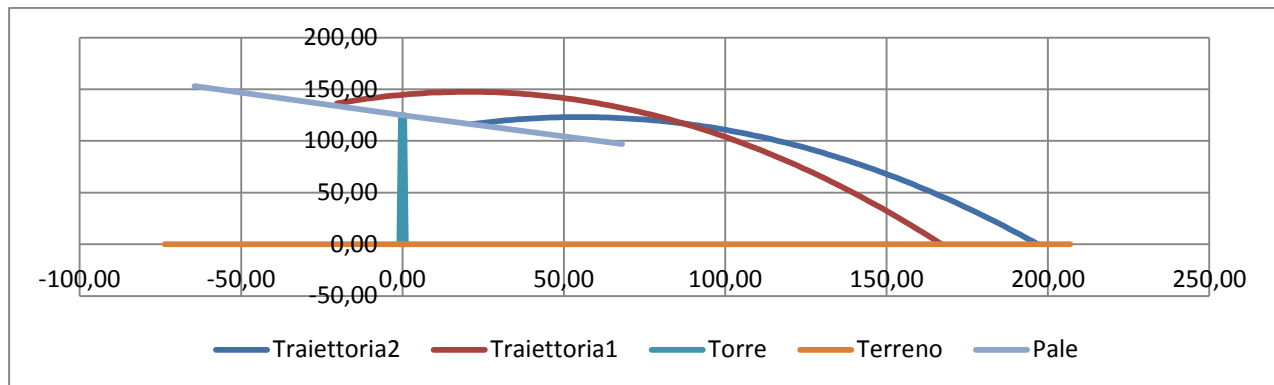


Figura 4 – Calcolo Gittata

Si noti che, fissato un generico angolo  $\theta$ , la gittata aumenta quadraticamente con  $V_g$  salvo i casi particolari  $\theta = +90^\circ, 0^\circ, 180^\circ$ , nei quali la gittata aumenta linearmente con  $V$  oppure è pari a  $rg$ .

Come si evidenzia dal grafico, il valore massimo della gittata per la traiettoria 2 è pari a 196,89 m circa con un angolo di distacco di circa  $\theta = 22^\circ$  circa

Pertanto, nell'ipotesi di distacco di una pala nel punto di serraggio del mozzo, punto di maggiore sollecitazione a causa del collegamento, considerando le seguenti ipotesi:

il baricentro della pala è posizionato ad  $1/3$  rispetto alla lunghezza della pala;

il moto del sistema è considerato di tipo rigido non vincolato;

le componenti dell'accelerazione saranno  $a_x = 0$ ,  $a_y = -g$ .

la velocità periferica è uguale a quella calcolata in precedenza (incrementando del 5% la velocità angolare massima del rotore)

Il massimo valore della gittata sarà pari al valore calcolato in precedenza, 196,89 m circa, per  $\theta = 22^\circ$  circa con un tempo di volo pari a 7 s.

Lo studio, come specificato in precedenza, è stato effettuato senza tener conto degli effetti mitigativi quali attrito dell'aria, portanza, moto rotazionale della pala stessa.

Da letteratura e dalle considerazioni sopra elencate è verosimile ritenere, con buona approssimazione, che nel caso reale i risultati siano minori di circa il 20% rispetto a quelli teorici ottenuti.

Nel caso reale i risultati possono quindi essere riassunti in:

- Tempo di volo: 5,6 s.
- Distanza nel piano: 157,5 m



## 5. CONCLUSIONI

A seguito delle ipotesi e dei calcoli effettuati nei paragrafi precedenti, si può concludere che, per l'aerogeneratore Vestas V150-4.2MW di altezza mozzo pari a 125 m, nelle condizioni reali, alla velocità massima di rotazione di 12,6 rpm, la distanza massima del punto d'impatto del baricentro di una pala distaccatasi dal rotore è, con buona approssimazione, circa 160 m.

Si evidenzia che, considerato che il verso di rotazione del rotore è sempre orario nel piano (x,z) (ovvero il piano ortogonale all'asse del rotore), la gittata massima si ottiene sempre nel semipiano positivo (xz); tale semipiano, in condizioni di esercizio dell'aerogeneratore, è sempre ortogonale alla direzione del vento, purché questo possieda energia sufficiente a consentire il raggiungimento della velocità massima di rotazione delle pale.

Per tale ragione, per lo specifico campo di installazione dell'aerogeneratore oggetto delle valutazioni, nonché per ciascuno degli aerogeneratori installati nel medesimo campo, una attenta valutazione della direzione ed intensità del vento esistente nell'area di installazione, in modo da individuare l'effettiva probabilità di accadimento del distacco dell'intera pala in taluni semipiani, così come definiti sopra; ovvero, si considera, per l'individuazione di tali semipiani, quelli ortogonali alla direzione prevalente del vento nell'area in cui l'aerogeneratore verrà installato, valutando eventualmente, in base ai dati storici disponibili per l'area in esame, l'effettiva probabilità che la rottura si verifichi in un determinato piano in funzione della probabilità di occorrenza di eventi ventosi con velocità sufficiente a generare la rotazione del rotore alla sua massima velocità.

Si rappresenta, infine, che la rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore ad asse orizzontale deve essere, in ogni caso, considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse. Le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro rinforzata con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche. L'utilizzo di questi materiali limita, infatti, sino a quasi ad annullarla, la probabilità di distacco di parti della pala mentre la stessa è in rotazione: anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono, di fatto, unita in un unico pezzo ed i sistemi di controllo dell'aerogeneratore riducono pressoché istantaneamente la velocità di rotazione, eliminando la possibilità che un frammento di pala si stacchi e venga proiettato verso l'alto.

Seppur statisticamente non rilevante, in teoria le cause di danno ad una pala possono essere prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare è protetto dalla fulminazione in accordo alla norma IEC 61400-24 – livello I.

Tutti gli accorgimenti tecnologici previsti per dell'aerogeneratore utilizzato, possono far assumere la gittata in caso di rottura accidentale pari a zero.