

OTTOBRE 2022



**Sardeolica S.r.l. - Gruppo SARAS**  
**PARCO EOLICO ON-SHORE "ASTIA"**

**POTENZA NOMINALE 31,7 MWp**

**COMUNE DI VILLAMASSARGIA (Sulcis Iglesiente)**

**Montana**

**ELABORATO R34**

**CALCOLO GITTATA ELEMENTI ROTANTI**

**Progettista**

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

**Coordinamento**

*Riccardo Festante*

*Eleonora Lamanna*

*Carla Marcis*

**Codice elaborato**

*2527-4953-VM\_VIA\_R34\_Rev0\_Gittata massima.docx*

## Memorandum delle revisioni

Cod. Documento	Data	Tipo revisione	Redatto	Verificato	Approvato
2527-4953-VM_VIA_R34_Rev0_Gittata massima.docx	31/10/2022	Prima revisione	GF	RF/CM	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
Riccardo Festante	Coordinamento Progettazione, Tecnico competente in acustica	ENTECA n. 3965
Eleonora Lamanna	Coordinamento Studi Specialistici, Studio di Impatto Ambientale	
Carla Marcis	Coordinamento Progettazione, 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	
Sonia Morgese	Ingegnere Civile Ambientale – Esperto Ambientale Idraulica Junior	
Lorenzo Griso	Esperto GIS - 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 | Siracusa

C. F. e P. IVA 10414270156  
Cap. Soc. 600.000,00 €

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





<i>Sara Zucca</i>	<i>Architetto – Esperto GIS - Esperto Ambientale</i>	
<i>Andrea Mastio</i>	<i>Ingegnere per l'Ambiente e il Territorio - Esperto Ambientale Junior</i>	
<i>Andrea Fronteddu</i>	<i>Ingegnere Elettrico – Progettazione Elettrica</i>	<i>Ord. Ing. Cagliari n. 8788 – Sez. A</i>
<i>Matthew Piscedda</i>	<i>Esperto in Discipline Elettriche</i>	
<i>Francesca Casero</i>	<i>Architetto – Esperto GIS - Esperto Ambientale Junior</i>	

**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 | Siracusa

C. F. e P. IVA 10414270156  
Cap. Soc. 600.000,00 €

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





## INDICE

1.	PREMESSA GENERALE .....	5
1.1	PRESENTAZIONE DEL PROGETTO.....	5
1.2	LOCALIZZAZIONE AREA DI INTERVENTO .....	5
1.3	DATI GENERALI DEL PROGETTO .....	6
1.4	SCOPO DEL DOCUMENTO .....	7
2.	DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO.....	8
2.1	SPECIFICHE TECNICHE AEROGENERATORI .....	8
3.	CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI.....	9
3.1	APPROCCIO AL CALCOLO .....	9
3.2	DISTACCO DI UNA PALA DAL ROTORE.....	9
3.3	ROTTURA DELL'ESTREMITÀ DI UNA PALA.....	10
3.4	IPOTESI DI CALCOLO .....	11
3.5	FORMULAZIONI .....	12
3.5.1	Calcolo della gittata per l'aerogeneratore VESTAS V136 – 4,5 MW .....	12
3.5.2	Calcolo della gittata per l'aerogeneratore VESTAS V162-6.8 MW.....	17
4.	APPLICAZIONE DEI RISULTATI ALL'IMPIANTO EOLICO IN PROGETTO .....	22
4.1	CONCLUSIONI.....	25

## 1. PREMESSA GENERALE

### 1.1 PRESENTAZIONE DEL PROGETTO

Il presente documento costituisce parte integrante del progetto definitivo per la realizzazione di un nuovo Parco eolico della potenza complessiva di 31,7 MW, che prevede l'installazione di 5 aerogeneratori (di cui 4 da 6,8 MW e 1 da 4,5 MW), nel territorio comunale di Villamassargia (Sulcis-Iglesiente), la realizzazione delle relative opere di connessione nei comuni di Villamassargia e Musei (cavidotto interrato e cabina di consegna), nonché la predisposizione della viabilità, delle opere di regimentazione delle acque meteoriche e delle reti tecnologiche a servizio del Parco.

La Società proponente è la Sardeolica S.r.l., con sede legale in VI strada Ovest, Z. I. Macchiarreddu 09068 Uta (Cagliari) e sede amministrativa in Milano, c/o Saras S.p.A., Galleria Passarella 2, 20122 – Milano.

### 1.2 LOCALIZZAZIONE AREA DI INTERVENTO

L'area oggetto di studio ricade nei comuni di Villamassargia (aerogeneratori, cavidotto interrato e cabina di smistamento) e Musei (cavidotto interrato e cabina di consegna), in un territorio caratterizzato da rilievi boscosi, tra la pianura campidanese e le aree montuose dell'Iglesiente. La successiva Figura 1-1 illustra l'inquadramento territoriale dell'area di interesse su ortofoto.

I Comuni di Villamassargia e di Musei cadevano nella Provincia Sud Sardegna, secondo la riforma della L.R. n. 2 del 4 febbraio 2016 - "Riordino del sistema delle autonomie locali della Sardegna". La LR n.7 del 12 aprile 2021 riorganizza la Regione in 8 Province: Città metropolitana di Sassari, Città metropolitana di Cagliari, Nord-Est Sardegna, Ogliastra, Medio Campidano, Nuoro e Oristano; sulla base di questa legge il Comune di Villamassargia rientra nella Provincia Sulcis-Iglesiente.

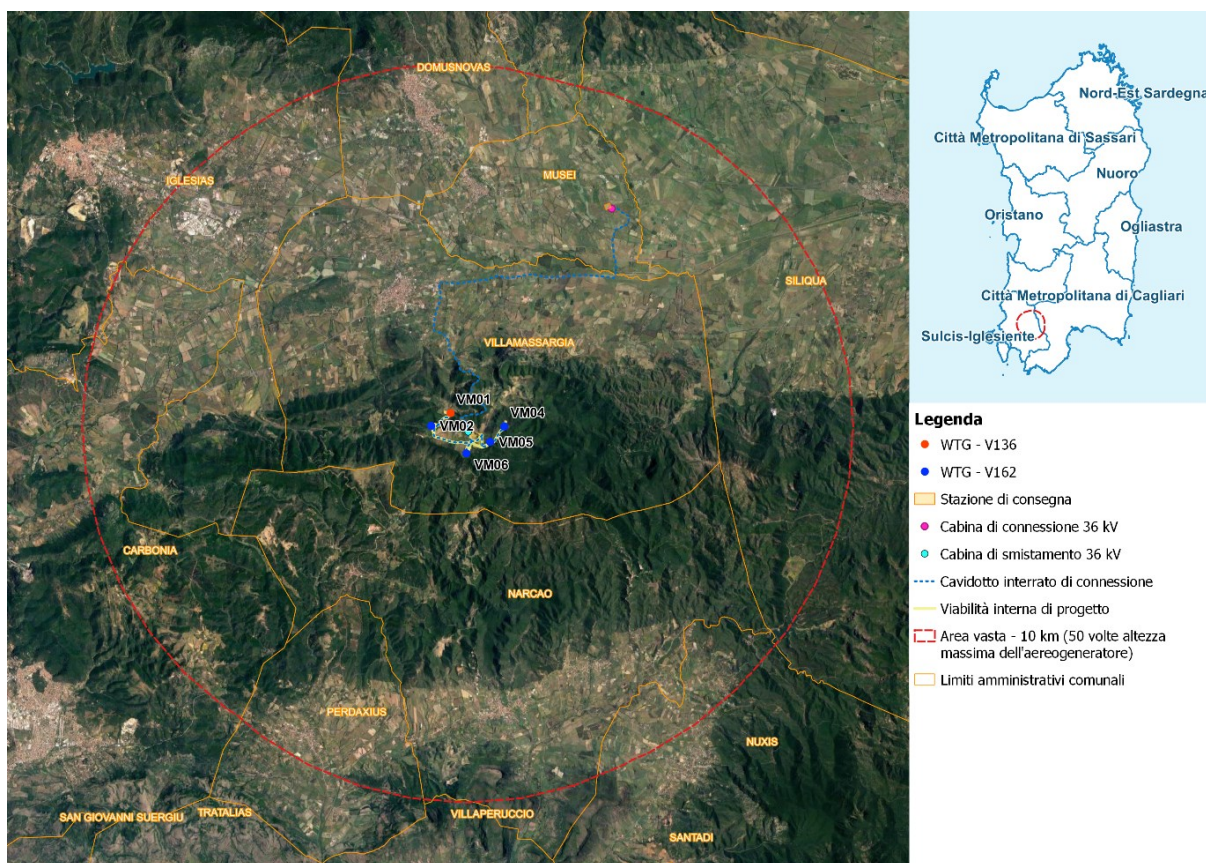


Figura 1-1: Inquadramento generale dell'area di progetto

Allo stato attuale, la Soluzione Tecnica Minima Generale (STMG) elaborata, prevede che l'impianto eolico venga collegato in antenna a 36 kV alla sezione 36 kV della Stazione Elettrica (SE) di successiva realizzazione, ipotizzata nel territorio comunale di Musei.

La connessione alla suddetta Stazione elettrica sarà realizzata mediante una linea elettrica 36 kV di circa 100 m in partenza da una cabina denominata di connessione e raccolta; a quest'ultima arriveranno le linee di alimentazione da una seconda cabina, detta di smistamento, in cavo interrato 36 kV posizionata ad una distanza di circa 14 km dalla prima. Alla cabina di smistamento arriveranno le linee a servizio delle WTG collegate tra loro in configurazione entra-esce.

### 1.3 DATI GENERALI DEL PROGETTO

Nella Tabella 1-1 sono riepilogati i dati principali del progetto, mentre in Tabella 1-2, in forma sintetica le principali caratteristiche tecniche dell'impianto e delle singole WTG che si prevede di installare.

Tabella 1-1: Dati di progetto

PARAMETRO	DESCRIZIONE
Richiedente	Sardeglica S.r.l.
Luogo installazione parco eolico	Territorio comunale di Villamassargia
Denominazione impianto	Astia
Potenza nominale parco eolico	31,7 MW
Numero aerogeneratori	5
Connessione	Interfacciamento alla rete mediante connessione in MT su stazione elettrica (SE) della RTN da realizzare (STMG prot. N. GRUPPO TERNA/P20210104707-23/12/2021)
Area interessata dall'intervento	Territori comunali di Villamassargia (WTG e opere di connessione) e Musei (opere di connessione)
Coordinate impianto (wgs84) (accesso al sito)	39°14'14.54"N 8°39'57.64"E

Tabella 1-2: Coordinate WTG proposte (sistema di coordinate Monte Mario – fuso ovest – EPSG 3003) e principali caratteristiche degli aerogeneratori

WTG	COORDINATE GEOGRAFICHE		TIPOLOGIA E CARATTERISTICHE AEROGENERATORE				
	ID	Latitudine N	Longitudine E	Modello	Potenza nominale [MW]	Altezza al mozzo [m]	Diametro rotore [m]
VM01	4343971	1470579	Vestas V136	4,5	82	136	150
VM02	4343602	1470021	Vestas V162	6,8	119	162	200
VM04	4343588	1472121	Vestas V162	6,8	119	162	200
VM05	4343143	1471713	Vestas V162	6,8	119	162	200
VM06	4342815	1471030	Vestas V162	6,8	119	162	200

#### **1.4 SCOPO DEL DOCUMENTO**

Il presente elaborato costituisce l'analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti e della gittata massima relativa al progetto del Parco Eolico ON-SHORE "ASTIA" descritto nei paragrafi precedenti.

Con il presente studio si intende valutare la massima distanza (gittata) che la pala di un aerogeneratore potrebbe compiere, nell'ipotesi di improvviso distacco dal punto di serraggio sul mozzo, punto maggiormente sollecitato in quanto costituisce il collegamento della pala al rotore.

Si vuole dunque individuare la massima circonferenza all'interno della quale è possibile che la pala ricada in caso di distacco dal mozzo.

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo in esame, sono le più gravose possibili, in modo da investigare la situazione peggiore e porsi quindi nella condizione maggiormente cautelativa.

## 2. DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO

Sono previste in progetto due differenti tipologie di turbine:

- a. Vestas V136-4.5 MW
- b. Vestas V162-6.8 MW

Lo studio della gittata massima è stato condotto per entrambe le tipologie di aerogeneratore scelte.

### 2.1 SPECIFICHE TECNICHE AEROGENERATORI

Gli Aerogeneratori Vestas V136-4.5 MW e Vestas V162-6,8 MW sono dotati 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. Le informazioni relative agli aerogeneratori sono riportate di seguito in tabella.

Tabella 2.1: Caratteristiche generali delle turbine

AEROGENERATORE	V136 – 4,5 MW	V162 – 6,8 MW
DATI DI FUNZIONAMENTO		
Potenza nominale	4,5 MW	6,8 MW
Velocità minima del vento	3 m/s	3 m/s
Velocità massima del vento	32 m/s	25 m/s
ROTORE		
Diametro del rotore	136 m	162 m
Area spazzata	14527 mq	20612 mq
Velocità angolare massima	14 RPM	12,1 RPM
PALA		
lunghezza	66,66 m	79,35 m
n. di pale	3	3



### 3. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

#### 3.1 APPROCCIO AL CALCOLO

La pala che durante la rotazione accidentalmente si distacca dal rotore è caratterizzata da una velocità iniziale  $V_0$  proporzionale alla velocità angolare del rotore ed al diametro rotorico. Ai fini del calcolo vengono impiegate, in via preliminare, le formule classiche della cinematica di corpo rigido, e non si tiene in considerazione l'interazione pala-aria, né la resistenza opposta dall'attrito dell'aria.

Il moto di un corpo rigido, in assenza di interazione con il fluido, è riconducibile alla somma di due moti, uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale ed uno uniformemente accelerato (con accelerazione pari all'accelerazione di gravità) in direzione verticale. Ne consegue che la traiettoria seguita da un corpo, in generale solido e di dimensioni ridotte, o meglio dal suo centro di massa, ha un andamento parabolico. La gittata è la distanza, sul piano orizzontale, tra la proiezione sullo stesso piano del punto di partenza del moto e il punto in cui esso raggiunge il piano.

La rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore ad asse orizzontale (parallelo al suolo) può essere considerato un evento molto raro, anche in considerazione della tecnologia costruttiva, dei materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse e delle periodiche operazioni di manutenzione e controllo a cui sono soggetti gli aerogeneratori nel corso della loro "vita utile" (con intervalli annuali).

Le pale degli aerogeneratori sono generalmente considerate "fail-safe", in quanto dal punto di vista progettuale la combinazione di coefficienti di sicurezza per i carichi, i materiali utilizzati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura rispettano quanto prescritto dalla norma IEC61400-1.

#### 3.2 DISTACCO DI UNA PALA DAL ROTORE

In questa analisi verrà presa in considerazione l'ipotesi di distacco completo della pala alla radice. Questa tipologia di incidente, seppur molto poco probabile, nasce dalla considerazione dell'esistenza di un punto di discontinuità costituito dalla giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo, per il quale esiste la possibilità di un cedimento strutturale.

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.

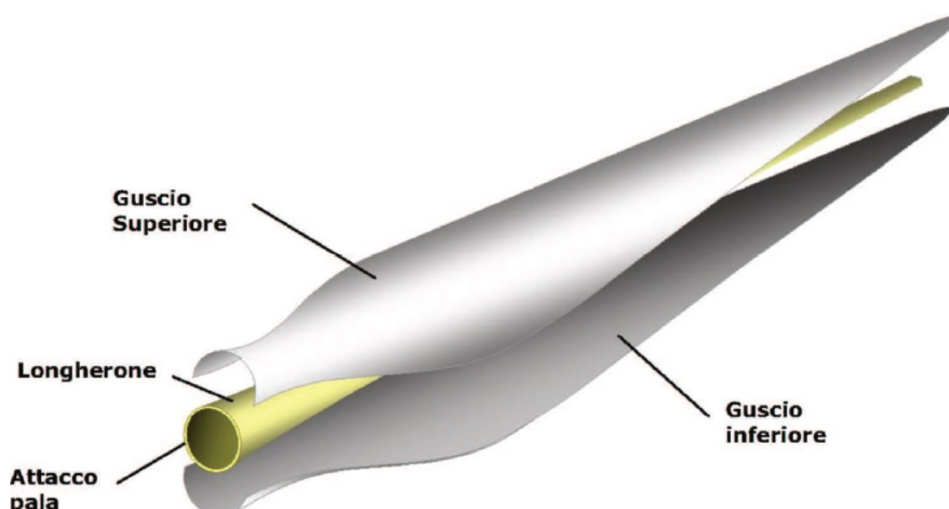


Figura 3.1: Schema strutturale di una pala eolica

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.

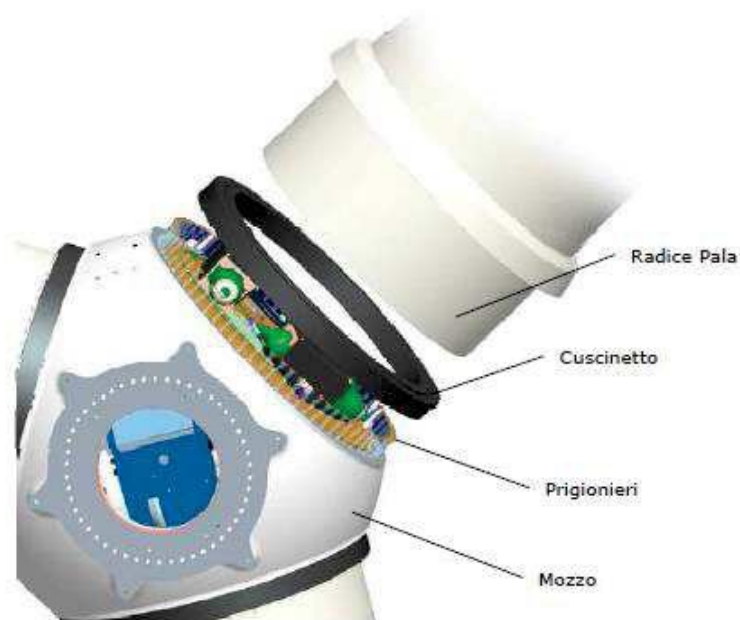


Figura 3.2: Schema strutturale di una pala eolica

### 3.3 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.

Da quanto esposto 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.

### 3.4 IPOTESI DI CALCOLO

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:

- moto irrotazionale: la pala non ruota intorno al proprio baricentro;
- forze resistenti nulle;
- 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 due casistiche, una con la velocità massima di rotazione del rotore dichiarata dal costruttore ed una seconda includendo 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.

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:

- 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),
- in assenza di forzanti (moto inerziale), come ad esempio quelle generate dal vento (ritenute trascurabili nella zona di installazione degli aerogeneratori oggetto della relazione),
- 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.

### 3.5 FORMULAZIONI

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.

#### 3.5.1 Calcolo della gittata per l'aerogeneratore VESTAS V136 – 4,5 MW

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  $r_g = 24,01 \text{ m}$  dal centro di rotazione; essendo il diametro del rotore  $D = 136 \text{ m}$  ed il raggio di ciascuna pala  $R = 68 \text{ m}$ .

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

Considerando la velocità angolare massima del rotore (14,00 giri/minuto), la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$V_g = \omega r_g = 2\pi n/60 r_g = 35,20 \text{ m/sec.}$$



A favore di sicurezza, aumentando del 5% la velocità massima del rotore (14,00 giri/minuto), otteniamo una velocità ipotetica pari a  $14 \cdot 1,05 = 14,7$  giri/minuto.

Per quest'ultima ipotesi, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$V_{g,5\%} = \omega r_g = 2 \pi n / 60 r_g = 36,96 \text{ m/sec.}$$

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 (82 m).

Pertanto  $H = 82,00$  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  $\vartheta$ :

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

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

$$V_g = 35,20 \text{ m/s}$$

$$V_{g,5\%} = 36,96 \text{ m/s}$$

$$r_g = 24,01 \text{ m}$$

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

$$H = 82 \text{ m}$$

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

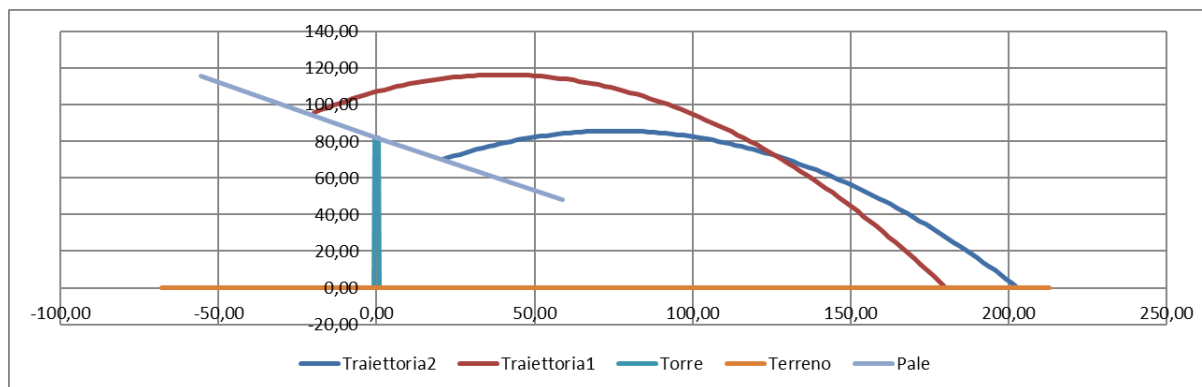


Figura 3.3: Calcolo gittata con velocità massima del rotore, modello V136. Rappresentazione grafica ipotesi di gittata massima e punti di distacco.

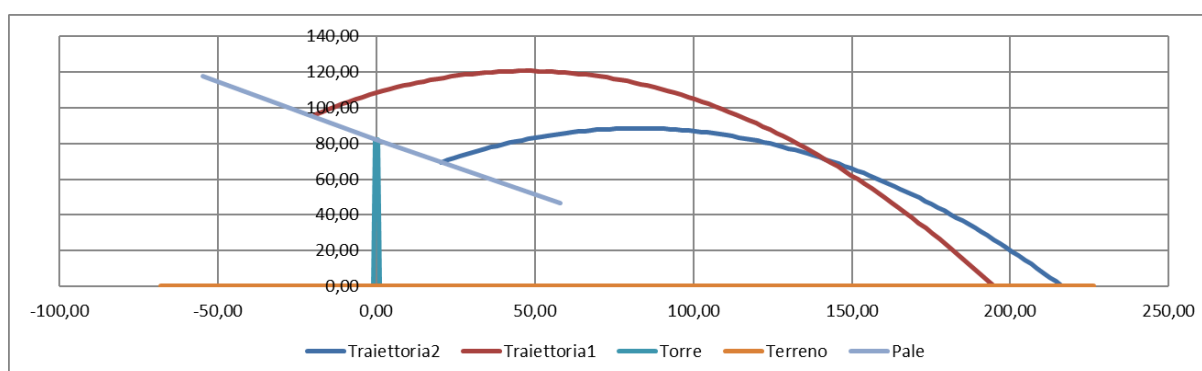


Figura 3.4: Calcolo Gittata con velocità massima del rotore aumentata del 5%, modello V136. Rappresentazione grafica ipotesi di gittata massima e punti di distacco.

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 dai grafici, il valore massimo della gittata si verifica in entrambi i casi per la traiettoria 2 ed è pari a 202 m considerando la velocità del rotore massima dichiarata dal costruttore e pari a **216 m** circa considerando la velocità del rotore aumentata del 5%. L'angolo di distacco è di circa  $\theta = 31^\circ$  per le due casistiche. Le figure Figura 3.3 e Figura 3.4 mostrano traiettorie diverse legate all'ipotesi del distacco della pala dal punto più lontano e da quello più vicino rispetto al punto di caduta della stessa. La traiettoria 1 è relativa al punto di distacco dalla torre più lontano rispetto al punto di caduta, mentre la traiettoria 2 rappresenta la gittata critica dovuta al distacco della pala ad una distanza minore dal punto di caduta.

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 per le due casistiche (velocità angolare massima del rotore e velocità angolare massima del rotore incrementata del 5%).

Il massimo valore della gittata sarà pari ai valori calcolati in precedenza, 202 m e 216 m circa, per  $\theta = 31^\circ$  circa. Supponendo di prendere in considerazione sempre la situazione più pericolosa, ossia quella

in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, il vertice della pala cadrà a (202+45)  $L_{tot} = 247 \text{ m}$  ed a (216+45)  $L_{tot} = 261 \text{ m}$  nel caso di velocità di rotore massima aumentata del 5%, entrambe per  $\theta = 31^\circ$  circa con un tempo di volo pari a circa 6 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 20-25% rispetto a quelli teorici ottenuti.

In Figura 3.5 e e 3.6 si riportano i grafici delle gittate massime calcolate in funzione dell'angolo  $\theta$  di rotazione al quale avviene il distacco.

Tabella 3.1: Parametri del calcolo delle gittate e risultati.

MODELLO VESTAS V136 4,5 MW	
ELEMENTO	DIMENSIONE
Lunghezza pala	66,66 [m]
Velocità rotazione	14,0 [rpm]
Velocità di rotazione + 5%	14,7 [rpm]
Altezza mozzo	82,0 [m]
Posizione baricentro rispetto al mozzo	24,0 [m]
Gittata massima	247 [m]
Gittata massima con velocità di rotazione aumentata del 5%	261 [m]
Angolo di distacco	31 [°]

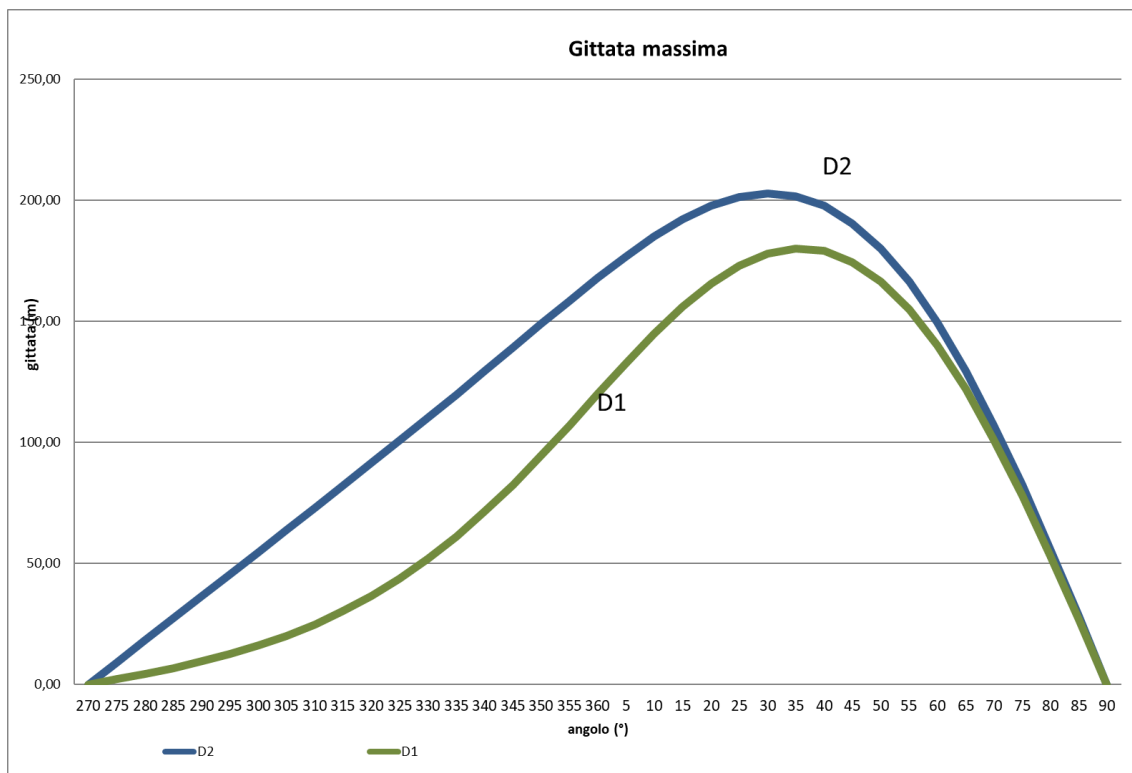


Figura 3.5: Calcolo Gittata massima [m] vs angolo di distacco [°], per modello Vestas V136, con velocità massima del rotore. Si rimanda al paragrafo 3.4 per la definizione delle traiettorie (D1=traiettoria1, D2=traiettoria2).

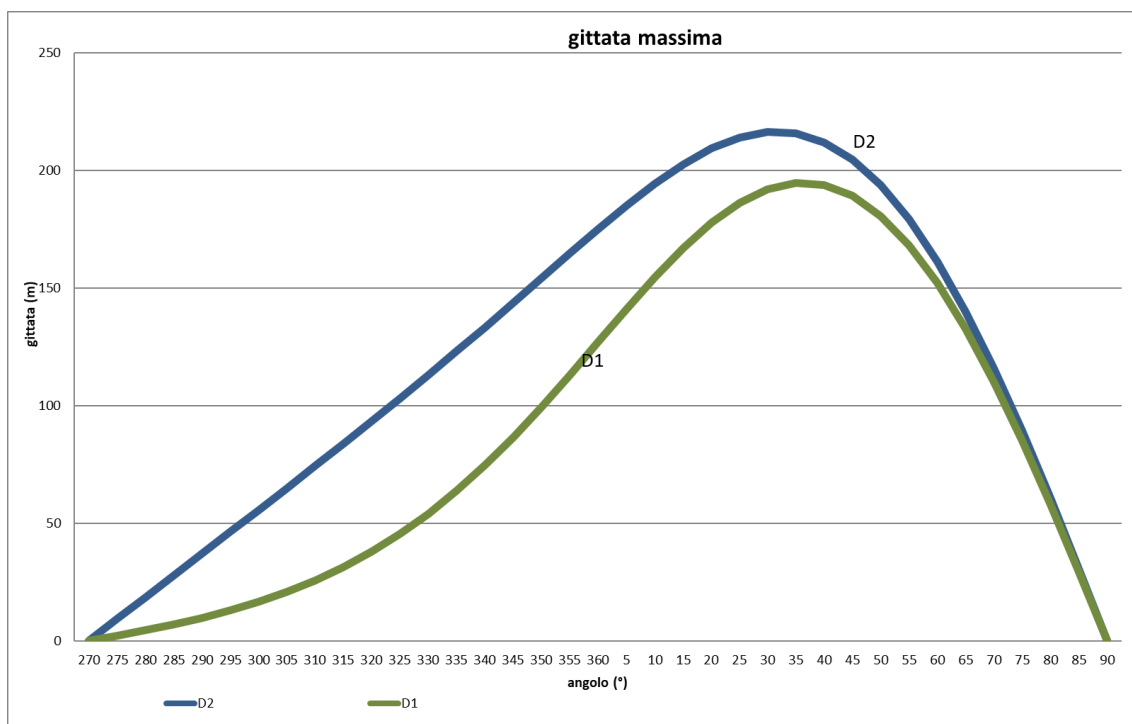


Figura 3.6: Calcolo Gittata massima [m] vs angolo di distacco [°], per modello Vestas V136, con velocità del rotore massima aumentata del 5%. Si rimanda al paragrafo 3.4 per la definizione delle traiettorie (D1=traiettoria1, D2=traiettoria2).



Va aggiunto che, in termini di sollecitazione, le posizioni più critiche dal punto di vista strutturale assunte dalla pala corrispondono, rispetto al sistema di riferimento, a quelle  $\vartheta=90^\circ$ , quando gli sforzi di flessione sono massimi, e  $\vartheta=180^\circ$ , quando è massimo il contributo gravitazionale:

- gli sforzi di flessione a cui è soggetta la pala sono massimi per  $\theta=90^\circ$  e sono trasferiti ai bulloni sotto forma di sforzi di trazione, per i bulloni posti al di sopra dell'asse neutro, e di compressione per quelli al di sotto dell'asse neutro;
- il contributo gravitazionale è massimo per  $\theta=180^\circ$  ed è trasferito ai bulloni sotto forma di sforzi di trazione.

Il corretto pretensionamento dei bulloni (in riferimento alle coppie di serraggio definite durante la fase di progettazione e alle normative di riferimento -Direttiva 2006/42/CE del 17 maggio 2006) è requisito fondamentale per garantirne l'integrità della giunzione.

Le condizioni di massima sollecitazione per i bulloni di serraggio della pala:  $\vartheta=90^\circ$  e  $\vartheta=180^\circ$ , rispettivamente a flessione e trazione, darebbero luogo a valori della gittata massima decisamente più bassi di quelli riportati in Tabella 3.1

### 3.5.2 Calcolo della gittata per l'aerogeneratore VESTAS V162-6.8 MW

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  $r_g=28,65$  m dal centro di rotazione; essendo il diametro del rotore  $D = 162$  m ed il raggio di ciascuna pala  $R = 81$  m

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

Considerando la velocità angolare massima del rotore (12,10 giri/minuto), la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$V_g = \omega r_g = 2\pi n/60 r_g = 36,30 \text{ m/sec}$$

A favore di sicurezza, aumentando del 5% la velocità massima del rotore (12,10 giri/minuto), otteniamo una velocità ipotetica pari a  $12,1 \cdot 1,05 = 12,7$  giri/minuto.

Per quest'ultima, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$V_{g,5\%} = \omega r_g = 2\pi n/60 r_g = 38,10 \text{ m/sec}$$

La posizione e la velocità iniziale sono determinati, oltre che dalla velocità tangenziale appena calcolata, anche dall'angolo  $\theta$  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 (119 m).

Pertanto  $H = 119,00$  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:

$$V_g = 36,30 \text{ m/s}$$

$$V_{g,5\%} = 38,10 \text{ m/s}$$

$$r_g = 28,65 \text{ m}$$

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

$$H = 119 \text{ m}$$

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

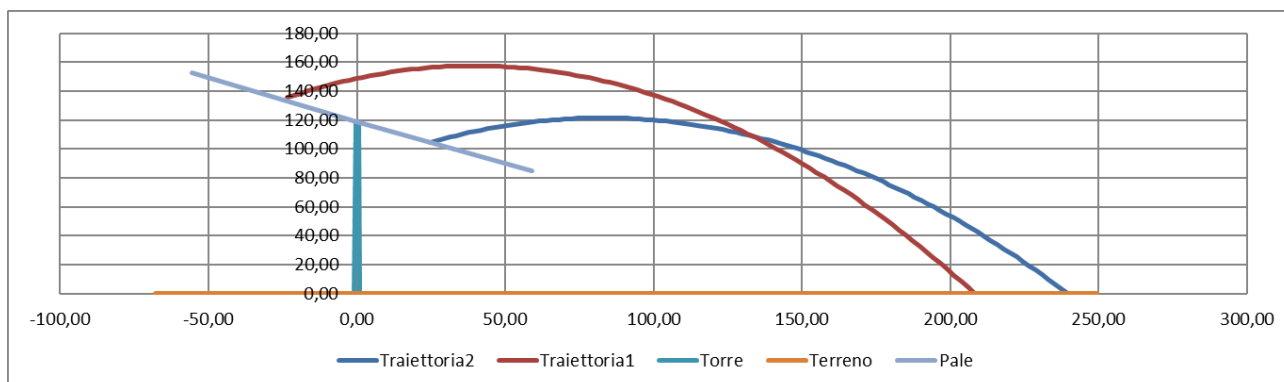


Figura 3.7: Calcolo gittata con velocità massima del rotore, modello V162. Rappresentazione grafica ipotesi di gittata massima e punti di distacco.

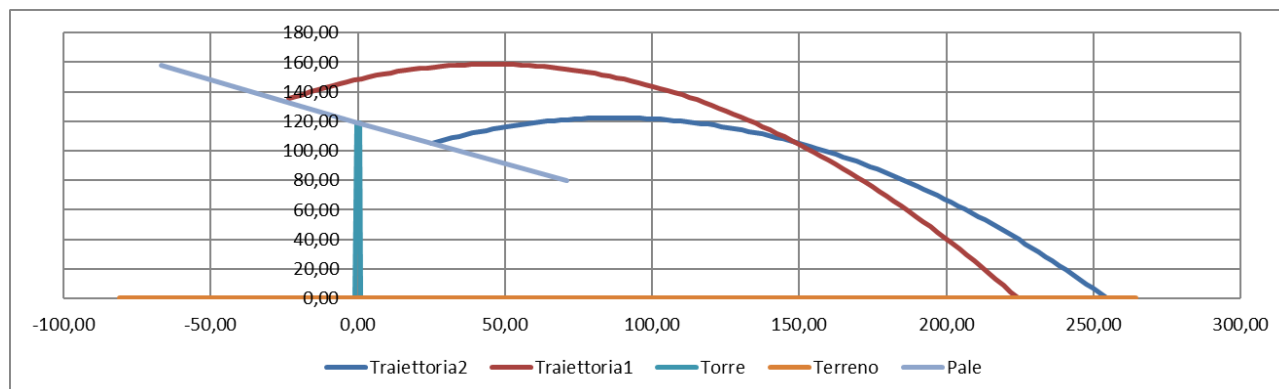


Figura 3.8: Calcolo Gittata con velocità massima del rotore aumentata del 5%, modello V162. Rappresentazione grafica ipotesi di gittata massima e punti di distacco.

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 dai grafici, il valore massimo della gittata si verifica in entrambi i casi per la traiettoria 2 ed è pari a 239 m con velocità del rotore massima dichiarata dal costruttore e pari ai 254 m circa con velocità del rotore aumentata del 5%. L'angolo di distacco è di circa  $\theta = 29^\circ$  per le due casistiche. Le figure Figura 3.7 e Figura 3.8 mostrano traiettorie diverse legate all'ipotesi del distacco della pala dal punto più lontano e da quello più vicino rispetto al punto di caduta della stessa. La traiettoria 1 è relativa al punto di distacco dalla torre più lontano rispetto al punto di caduta, mentre la traiettoria 2 rappresenta la gittata critica dovuta al distacco della pala ad una distanza minore dal punto di caduta.

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 per le due casistiche (velocità angolare massima del rotore e velocità angolare massima del rotore incrementata del 5%)

Il massimo valore della gittata sarà pari ai valori calcolati in precedenza, 239 m e 254 m circa, per  $\theta = 29^\circ$  circa. Supponendo di prendere in considerazione sempre la situazione più pericolosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, il vertice della pala cadrà a  $(239 + 53)$  **Ltot = 292** m ed a  $(254 + 53)$  **Ltot = 307** m nel caso di velocità di rotore massima aumentata del 5%, entrambe per  $\theta = 29^\circ$  circa con un tempo di volo pari a circa 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 20-25% rispetto a quelli teorici ottenuti.

In Figura 3.9 e Figura 3.10 si riportano i grafici delle gittate massime calcolate in funzione dell'angolo  $\theta$  di rotazione al quale avviene il distacco.

Tabella 3.2: Parametri del calcolo delle gittate e risultati.

MODELLO VESTAS V162 6,8 MW	
ELEMENTO	DIMENSIONE
Lunghezza pala	79,35 [m]
Velocità rotazione	12,1 [rpm]
Velocità di rotazione + 5%	12,7 [rpm]
Altezza mozzo	119,0 [m]
Posizione baricentro rispetto al mozzo	28,65 [m]
Gittata massima	292 [m]
Gittata massima con velocità di rotazione aumentata del 5%	307 [m]
Angolo di distacco	29 [°]

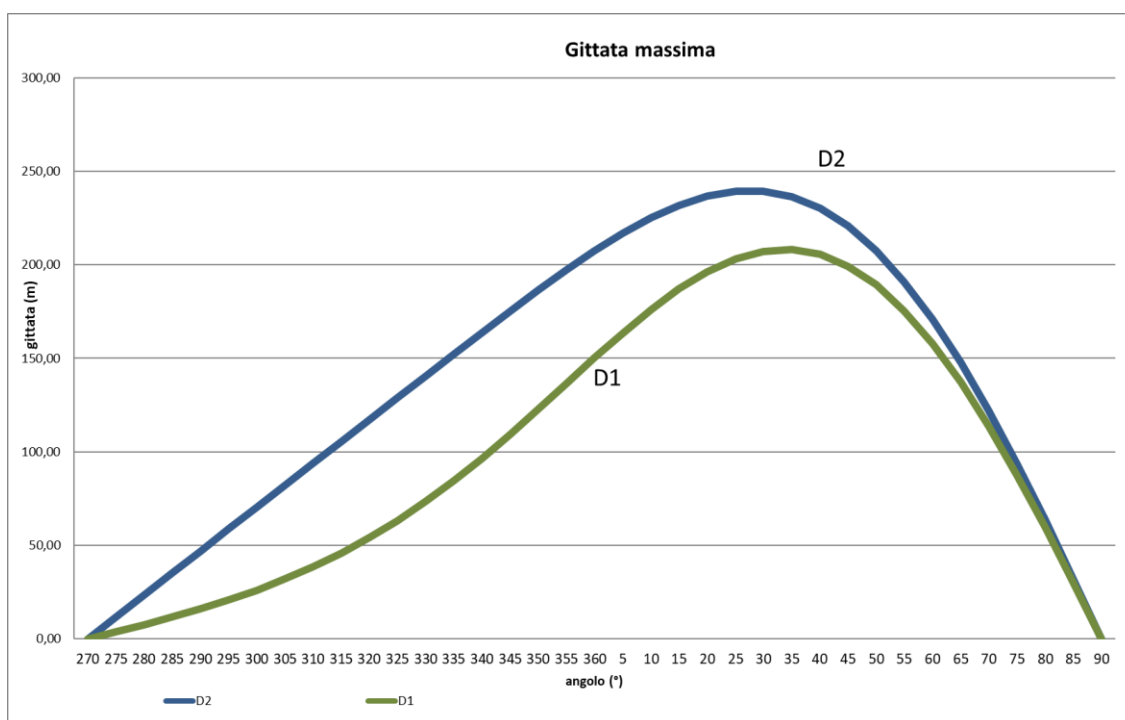


Figura 3.9: Calcolo Gittata massima [m] vs angolo di distacco [°], per modello Vestas V162, con velocità del rotore massima. Si rimanda al paragrafo 3.4 per la definizione delle traiettorie (D1=traiettoria1, D2=traiettoria2).

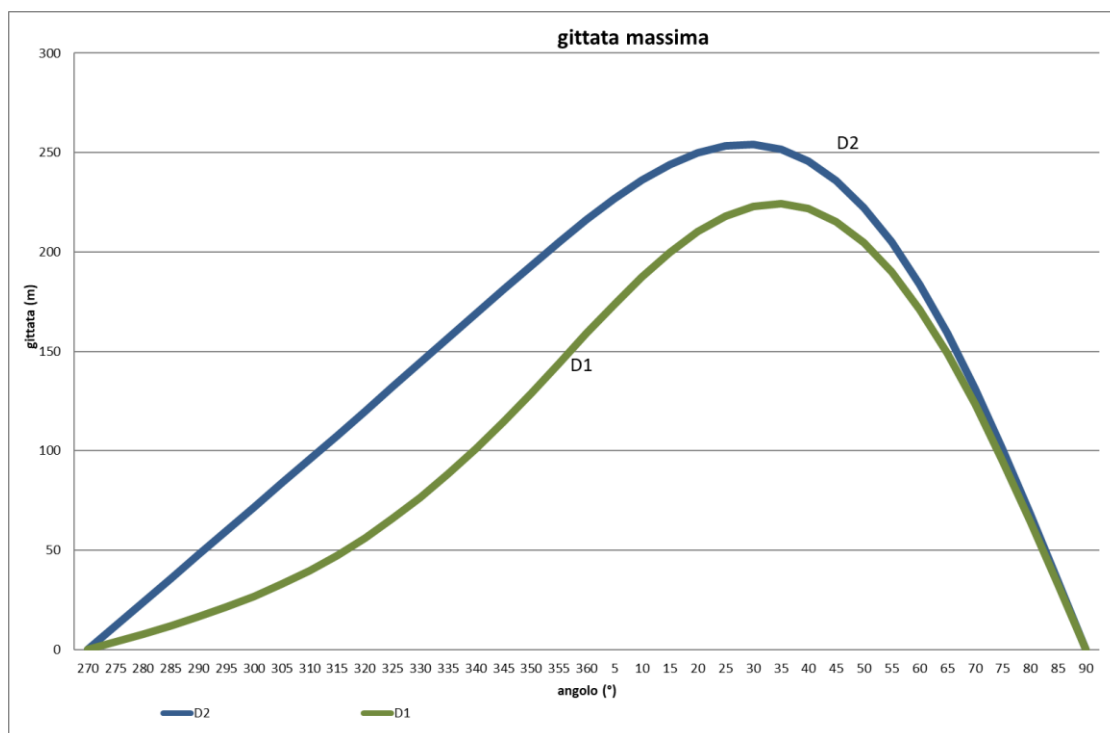


Figura 3.10: Calcolo Gittata massima [m] vs angolo di distacco [°], per modello Vestas V162, con velocità del rotore massima aumentata del 5%. Si rimanda al paragrafo 3.4 per la definizione delle traiettorie (D1=traiettoria1, D2=traiettoria2).

Va aggiunto che, in termini di sollecitazione, le posizioni più critiche dal punto di vista strutturale assunte dalla pala corrispondono, rispetto al sistema di riferimento, a quelle  $\vartheta=90^\circ$ , quando gli sforzi di flessione sono massimi, e  $\vartheta=180^\circ$ , quando è massimo il contributo gravitazionale:

- gli sforzi di flessione a cui è soggetta la pala sono massimi per  $\theta=90^\circ$  e sono trasferiti ai bulloni sotto forma di sforzi di trazione, per i bulloni posti al di sopra dell'asse neutro, e di compressione per quelli al di sotto dell'asse neutro;
- il contributo gravitazionale è massimo per  $\theta=180^\circ$  ed è trasferito ai bulloni sotto forma di sforzi di trazione.

Il corretto pretensionamento dei bulloni (in riferimento alle coppie di serraggio definite durante la fase di progettazione e alle normative di riferimento -Direttiva 2006/42/CE del 17 maggio 2006) è requisito fondamentale per garantirne l'integrità della giunzione.

Le condizioni di massima sollecitazione per i bulloni di serraggio della pala:  $\vartheta=90^\circ$  e  $\vartheta=180^\circ$ , rispettivamente a flessione e trazione, darebbero luogo a valori della gittata massima decisamente più bassi di quelli riportati in Tabella 3.2.

#### 4. APPLICAZIONE DEI RISULTATI ALL'IMPIANTO EOLICO IN PROGETTO

I risultati ed i suggerimenti contenuti nello studio prodotto saranno di seguito applicati nello specifico all'impianto eolico proposto.

In particolare, facendo seguito alle indicazioni del suddetto studio, si andranno ad analizzare gli effetti della rottura degli aerogeneratori all'interno dei buffer di 292 m e, cautelativamente, di 307 m dall'asse della WTG V162-6.8 MW e all'interno del buffer di 247 e, cautelativamente, di 261 m dall'asse della WTG V136 – 4,5 MW.

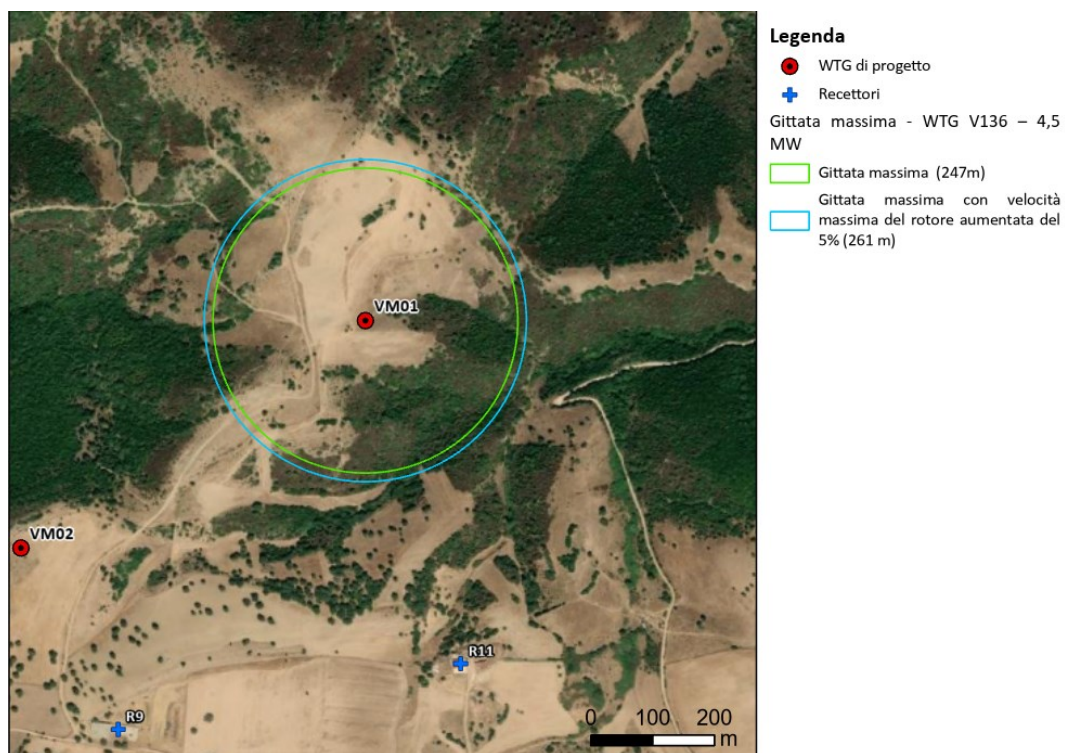


Figura 4.1: Gittata massima WTG V136 – 4,5 MW – VM01

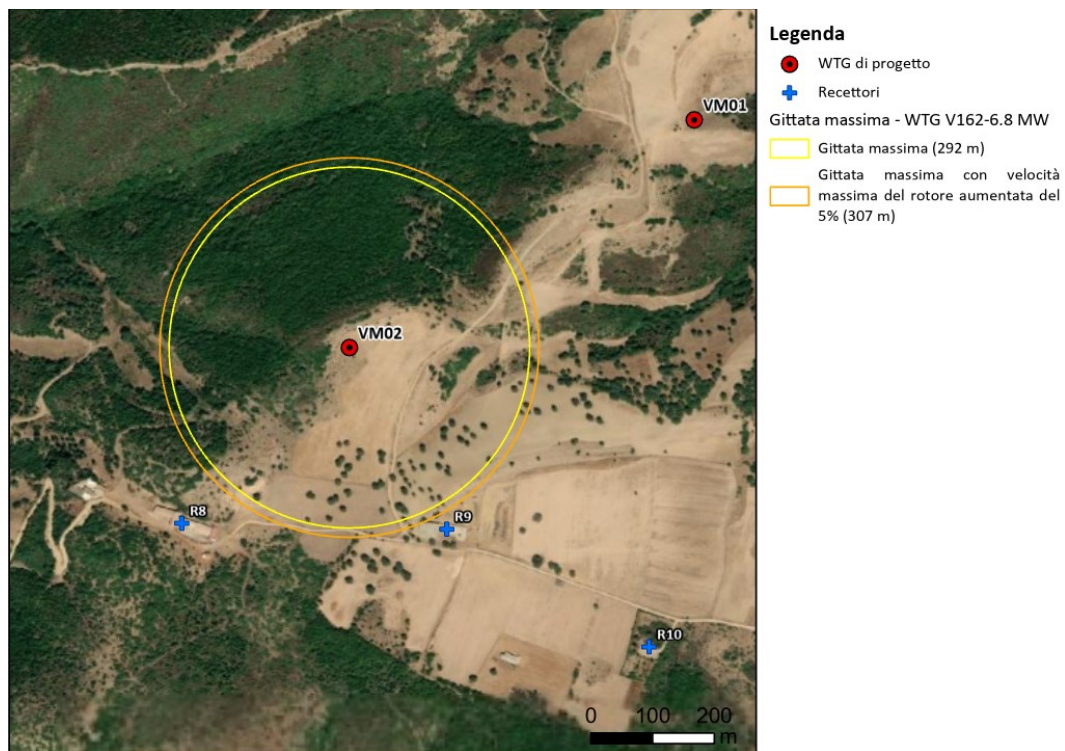


Figura 4.2: Gittata massima WTG V162-6.8 MW – VM02

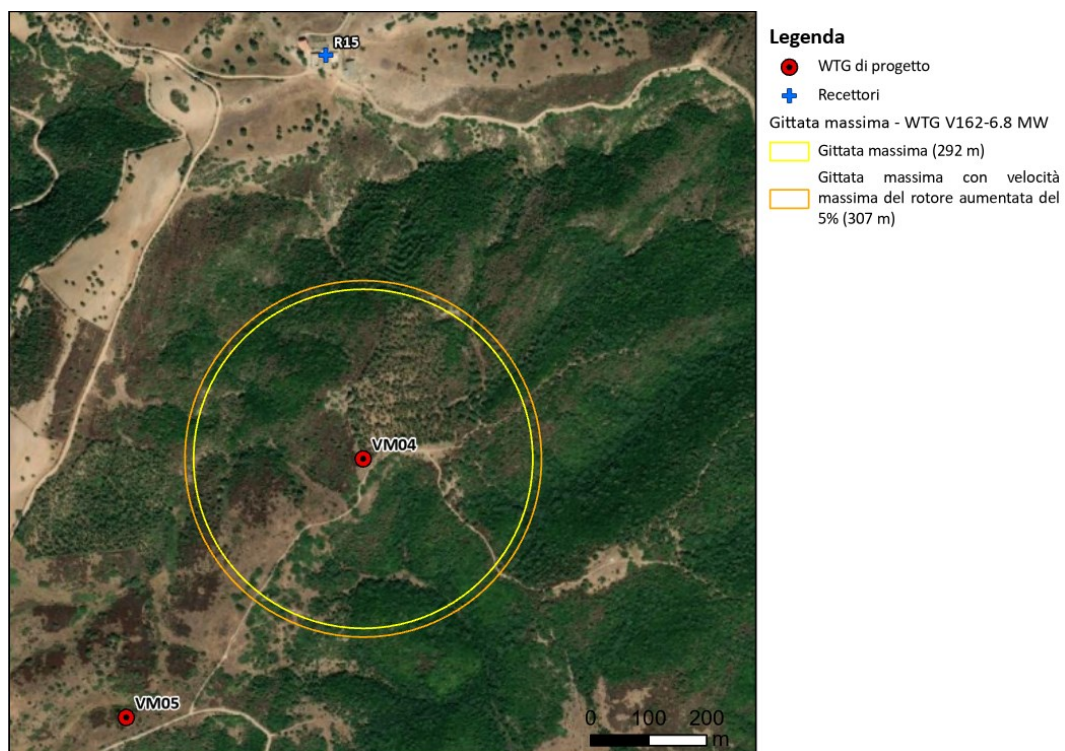


Figura 4.3: Gittata massima WTG V162-6.8 MW – VM04

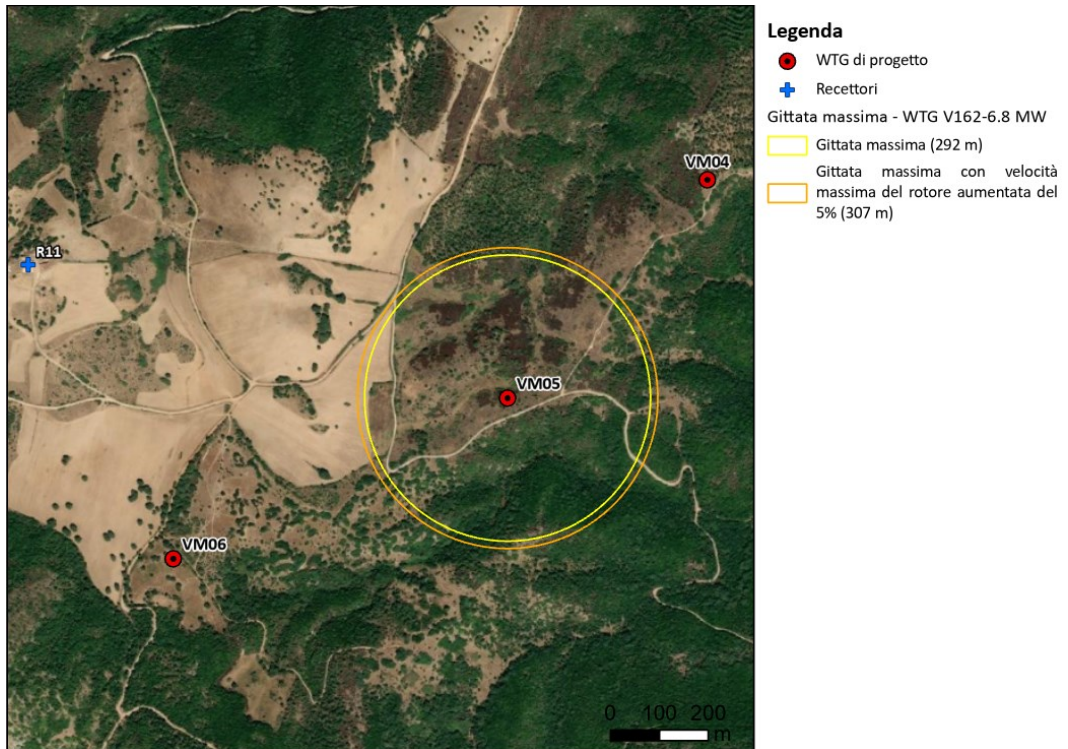


Figura 4.4: Gittata massima WTG V162-6.8 MW – VM05

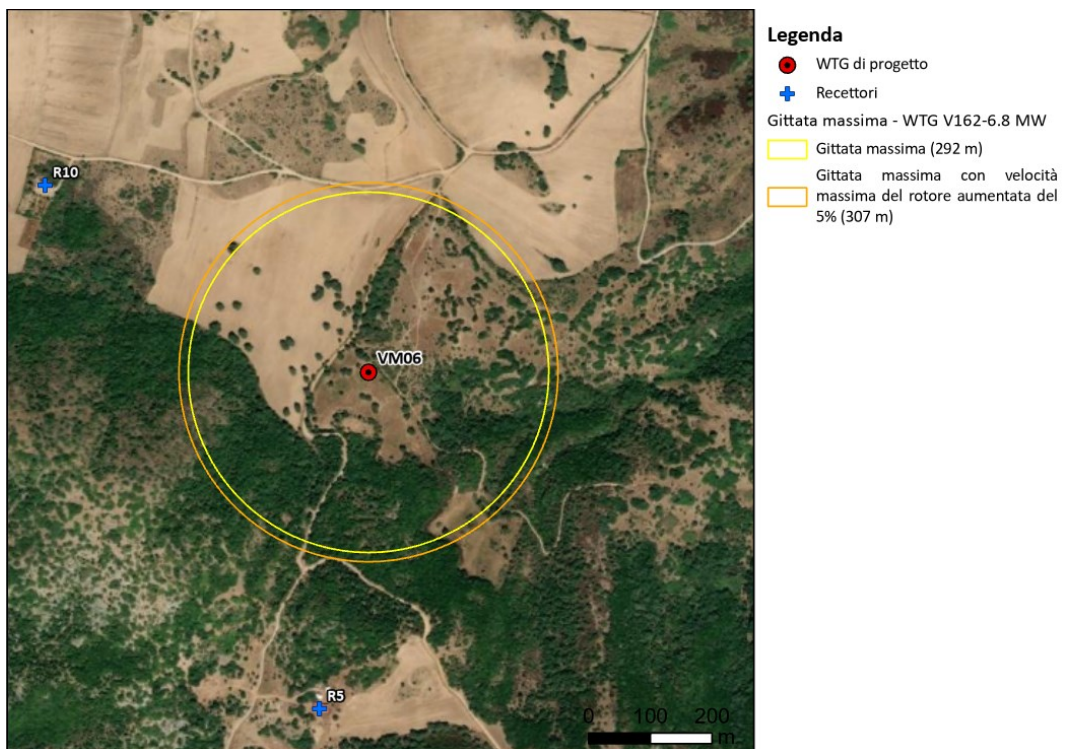


Figura 4.5: Gittata massima WTG V162-6.8 MW – VM06

Dall'analisi condotta, si evince che all'interno dei buffer non ricade nessun recettore.



## 4.1 CONCLUSIONI

I risultati ottenuti evidenziano che, per ciascuno dei 5 aerogeneratori del parco eolico, l'ipotetica gittata della pala non interessa alcun recettore.

A seguito delle ipotesi e dei calcoli effettuati nei paragrafi precedenti, si può concludere che:

- per l'aerogeneratore Vestas V136-4.5MW di altezza mozzo pari a 82 m, alla velocità massima di rotazione del rotore dichiarata dal costruttore (pari a 14,00 rpm), la distanza massima del punto d'impatto del baricentro di una pala distaccatasi dal rotore è, con buona approssimazione, pari a **circa 247 m**.
- per l'aerogeneratore Vestas V136-4.5MW di altezza mozzo pari a 82 m, alla velocità massima di rotazione del rotore aumentata del 5% a favore di sicurezza (pari a 14,7 rpm), la distanza massima del punto d'impatto del baricentro di una pala distaccatasi dal rotore è, con buona approssimazione, pari a **circa 261 m**.
- per l'aerogeneratore Vestas V162-6.8MW di altezza mozzo pari a 119 m, alla velocità massima di rotazione del rotore dichiarata dal costruttore (pari a 12,10 rpm), la distanza massima del punto d'impatto del baricentro di una pala distaccatasi dal rotore è, con buona approssimazione, pari a **circa 292 m**.
- l'aerogeneratore Vestas V162-6.8MW di altezza mozzo pari a 119 m, alla velocità massima di rotazione del rotore aumentata del 5% a favore di sicurezza (pari a 12,7 rpm), la distanza massima del punto d'impatto del baricentro di una pala distaccatasi dal rotore è, con buona approssimazione, **pari a 307 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 rinforzato 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.

Dalle analisi effettuate si può assumere che il fenomeno di rottura degli organi rotanti di un aerogeneratore risulta altamente improbabile per il distacco intero della pala, e che per effetto della



fulminazione atmosferica frammenti di pala, solitamente di piccole dimensioni, sono stati ritrovati a non più di 40-50 m dalla base dell'aerogeneratore.

Alla luce delle considerazioni sopra esposte si può affermare che la realizzazione delle turbine nelle aree individuate **non costituirebbe pericolo per la pubblica incolumità in caso di distacco di pala dal mozzo del rotore.**