

FEBBRAIO 2023

**GIUDECCA WIND S.R.L.**



**WIND FARM GIUDECCA – IMPIANTO  
EOLICO DA 72 MW**

**COMUNE DI MANDAS, GERGEI E  
VILLANOVAFRANCA (SUD SARDEGNA)**

**Località “Riu Mortoriu”**

**Mantana**

**ELABORATI TECNICI DI PROGETTO  
ELABORATO R11  
RELAZIONE GITTATA MASSIMA**

**Progettista**

Ing. Laura Maria Conti – Ordine Ing. Prov. Pavia n. 1726

**Coordinamento**

Eleonora Lamanna

Matteo Lana

**Codice elaborato**

2799\_5298\_GIUD\_PD\_R11\_Rev0\_GITTATAMASSIMA.docx



## Memorandum delle revisioni

| Cod. Documento                                     | Data    | Tipo revisione  | Redatto | Verificato | Approvato |
|--|---------|-----------------|---------|------------|-----------|
| 2799_5298_GIUD_PD_R11_Rev0_GITT<br>ATAMASSIMA.docx | 01/2023 | Prima emissione | VG      | EL         | 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                            |
| Corrado Pluchino  | Responsabile Tecnico Operativo  | Ord. Ing. Prov. MI n. A27174                          |
| Eleonora Lamanna  | Coordinamento Progettazione, Studio Ambientale, Studi Specialistici       |   |
| Matteo Lana       | Coordinamento Progettazione Civile  |   |
| Andrea Amantia    | Geologo - Progettazione Civile  |   |
| Riccardo Festante | 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<br>ENTECA n. 4200 |
| Ali Basharзад     | Progettazione civile e viabilità  | Ord. Ing. Prov. PV n. 2301                            |
| Giancarlo Carboni | Geologo   | Ord. Geologi Sardegna n. 497                          |
| Mauro Aires       | Ingegnere Civile – Progettazione Strutture                                | Ord. Ing. Prov. Torino – n. 9588                      |
| Fabio Lassini     | Ingegnere Civile Ambientale – Progettazione Civile                        | Ord. Ing. Prov. MI n. A29719                          |
| Vincenzo Gionti   | Ingegnere Civile Ambientale – Progettazione Civile                        |   |
| Marco Iannotti    | Ingegnere Civile Idraulico  |   |
| Lia Buvoli        | Biologa – Esperto GIS – Esperto Ambientale                                |   |

### 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)





|                  |  |   |
|------------------|--|---|
| Elena Comi       | Biologa – Esperto GIS – Esperto Ambientale                           | Ord. Nazionale Biologi n. 060746 Sez. A |
| 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 |   |
| Andrea Delussu   | Ingegnere Elettrico – Progettazione Elettrica                        |   |
| Matthew Piscedda | Esperto in Discipline Elettriche                                     |   |
| Francesca Casero | Esperto Ambientale e GIS 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)





## INDICE

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | PREMESSA .....  | 5  |
| 1.1 | INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO .....                       | 6  |
| 1.2 | DESCRIZIONE GENERALE DI PROGETTO.....                           | 9  |
| 2.  | CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI.....       | 10 |
| 2.1 | APPROCCIO AL CALCOLO .....                                      | 10 |
| 2.2 | IPOTESI DI CALCOLO .....  | 12 |
| 2.3 | FORMULAZIONI .....  | 14 |
| 2.4 | GEOMETRIA DEL PROBLEMA E CALCOLO DELLA GITTATA .....            | 14 |
| 2.5 | CASI STUDIO .....   | 17 |
| 2.6 | CONSIDERAZIONI FINALI .....                                     | 18 |
| 3.  | APPLICAZIONE DEI RISULTATI ALL'IMPIANTO EOLICO IN OGGETTO ..... | 19 |
| 4.  | CONCLUSIONI .....   | 20 |



## 1. PREMESSA

Il progetto in esame riguarda la realizzazione di un nuovo Parco Eolico della potenza complessiva di 72 MW, che prevede l'installazione di n. 12 aerogeneratori da 6,0 MW, da installarsi nei territori comunali di Mandas, Gergei e Villanovafranca, nella Provincia del Sud Sardegna.

Si precisa che l'attribuzione dei Comuni alla Provincia del Sud Sardegna fa riferimento alla situazione amministrativa attuale (L.R. n. 2 del 4 febbraio 2016 - "Riordino del sistema delle autonomie locali della Sardegna").

Con la LR n.7 del 12 aprile 2021 la Regione Sardegna viene riorganizzata in 8 Province: Città Metropolitana di Sassari, Città Metropolitana di Cagliari, Nord-Est Sardegna, Ogliastra, Sulcis Iglesiente, Medio Campidano, Nuoro e Oristano, pertanto i Comuni interessati dalle opere ricadrebbero nella Provincia del Medio Campidano (Villanovafranca) e nella nuova Città Metropolitana di Cagliari (Mandas e Gergei). Tale legge è però stata impugnata dal governo italiano, che ha bloccato l'iter di attuazione in attesa del pronunciamento della Corte costituzionale e il 12 marzo 2022 la Consulta si è pronunciata a favore della Regione Autonoma della Sardegna, dando di fatto il via libera alla re-istituzione delle Province. Pertanto allo stato attuale dovrebbero essere attive le nuove Province, che di fatto non lo sono in quanto sono in attesa dei pronunciamenti referendari dei residenti dei Comuni di confine e il rinvio al 2025 della data per "l'effettiva operatività di Città metropolitane e Province", con un'ulteriore coda di sei mesi, necessaria per l'auspicata elezione diretta dei Consigli comunali e metropolitani<sup>1</sup>.

La Società Proponente è la Giudecca Wind 1 S.R.L., con sede legale in Via Friuli Venezia Giulia 75, 30030 Pianiga (VE).

Tale opera si inserisce nel quadro istituzionale di cui al D.Lgs. 29 dicembre 2003, n. 387 "Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità" le cui finalità sono:

- promuovere un maggior contributo delle fonti energetiche rinnovabili alla produzione di elettricità nel relativo mercato italiano e comunitario;
- promuovere misure per il perseguimento degli obiettivi indicativi nazionali;
- concorrere alla creazione delle basi per un futuro quadro comunitario in materia;
- favorire lo sviluppo di impianti di microgenerazione elettrica alimentati da fonti rinnovabili, in particolare per gli impieghi agricoli e per le aree montane.

La Soluzione Tecnica Minima Generale (STMG) elaborata, prevede che l'impianto eolico venga collegato in antenna a 150 kV sulla sezione a 150 kV di una futura Stazione Elettrica (SE) di Trasformazione RTN 380/150 kV da inserire in entra – esce alla linea RTN 380 kV "Ittiri - Selargius". Tale SE è in progetto in un'area posta a circa 20 km in direzione Sud-Ovest dal layout.

La connessione tra la SE Terna e il parco eolico verrà realizzata mediante una linea interrata AT a 150 kV, di circa 20 km, tra lo stallo dedicato in stazione Terna e la sottostazione elettrica utente (SSEU) dove avverrà la trasformazione AT/MT. La cabina generale MT raccoglierà i cavi provenienti dai singoli aerogeneratori.

Nel suo complesso il parco sarà composto da:

- N° 12 aerogeneratori della potenza nominale di 6.0 MW ciascuno
- Dalla viabilità di servizio interna realizzata in parte ex-novo e in parte adeguando strade comunali e/o agricole esistenti
- Dalle opere di regimentazione delle acque meteoriche

---

<sup>1</sup> <https://www.lanuovasardegna.it/regione/2022/11/08/news/le-nuove-province-sarde-saranno-operative-solo-fra-quattro-anni-1.100139202>

- Da un cavidotto di tensione pari a 30 kV interrato
- Da una cabina MT SSE utente interna all'area del parco
- Da una stazione utente di trasformazione 30/150 kV
- Da una connessione in antenna a 150 kV ad una costruenda SE
- Dalle reti tecnologiche per il controllo del parco

Con il presente studio si intende valutare la massima distanza (gittata) che la pala di un aerogeneratore avente altezza hub pari a 115 m e diametro del rotore pari a 170 m 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 nella situazione maggiormente cautelativa.

### 1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO

Il parco eolico in progetto si estende nei territori comunali di Villanovafranca, Mandas e Gergei, al di fuori dei centri abitati. Il progetto prevede l'installazione di n. 12 aerogeneratori così collocati (Figura 1.1):

- n. 4 aerogeneratori in Comune di Mandas;
- n. 1 aerogeneratore in Comune di Gergei;
- n. 7 aerogeneratori in Comune di Villanovafranca.

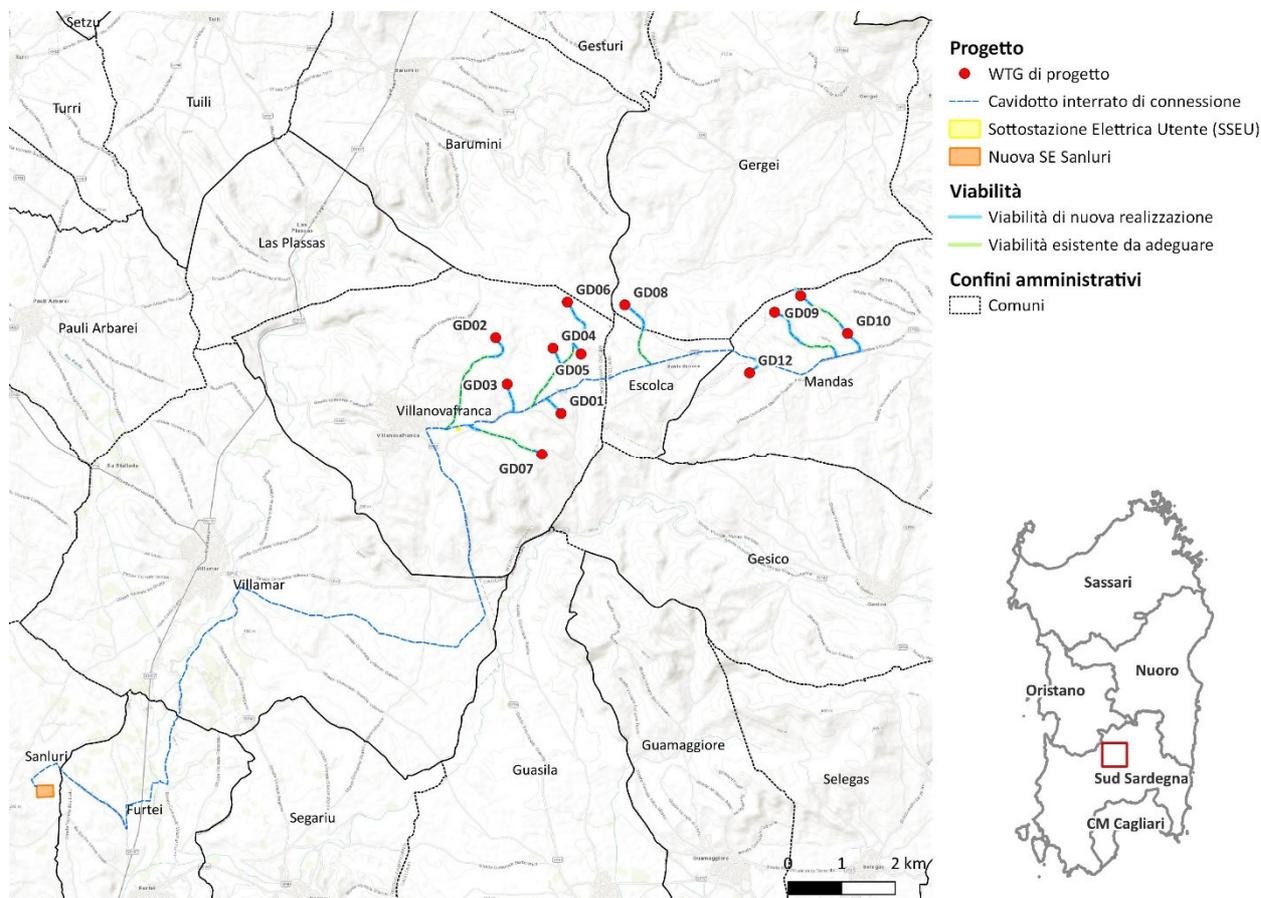


Figura 1.1: Localizzazione a scala regionale, provinciale e comunale dell'impianto proposto.



La sottostazione di trasformazione sarà ubicata nel territorio comunale di Villanovafranca, complessivamente la linea di connessione attraverserà i territori comunali di Mandas, Escolca, Villanovafranca, Villamar, Furtei e Sanluri.

Le coordinate degli aerogeneratori previsti sono riportate in Tabella 1-1.

*Tabella 1-1: Coordinate degli aerogeneratori previsti (EPSG 3003).*

| WTG  | X         | Y         |
|------|-----------|-----------|
| GD01 | 1503242,9 | 4388449,4 |
| GD02 | 1502022,8 | 4389874,9 |
| GD03 | 1502237,6 | 4389001,8 |
| GD04 | 1503091,0 | 4389678,0 |
| GD05 | 1503614,9 | 4389569,8 |
| GD06 | 1503361,1 | 4390544,8 |
| GD07 | 1502887,2 | 4387673,9 |
| GD08 | 1504431,1 | 4390492,8 |
| GD09 | 1507225,4 | 4390355,4 |
| GD10 | 1508587,2 | 4389955,3 |
| GD11 | 1507710,3 | 4390664,1 |
| GD12 | 1506758,2 | 4389214,5 |

L'accesso al sito avverrà mediante strade pubbliche esistenti a carattere nazionale e provinciale partendo dal vicino porto industriale Cagliari o in alternativa da quello poco più distale di Portovesme.

All'interno dell'area dell'impianto verranno utilizzate come viabilità primaria le strade statali SS128 e SS197; la Strada Provinciale SP36 rappresenta il perno delle viabilità secondaria, permettendo di raggiungere facilmente le aree per la costruzione degli aerogeneratori, mediante strade secondarie (asfaltate e/o sterrate) esistenti e mediante la realizzazione di apposite piste (Figura 1.2).

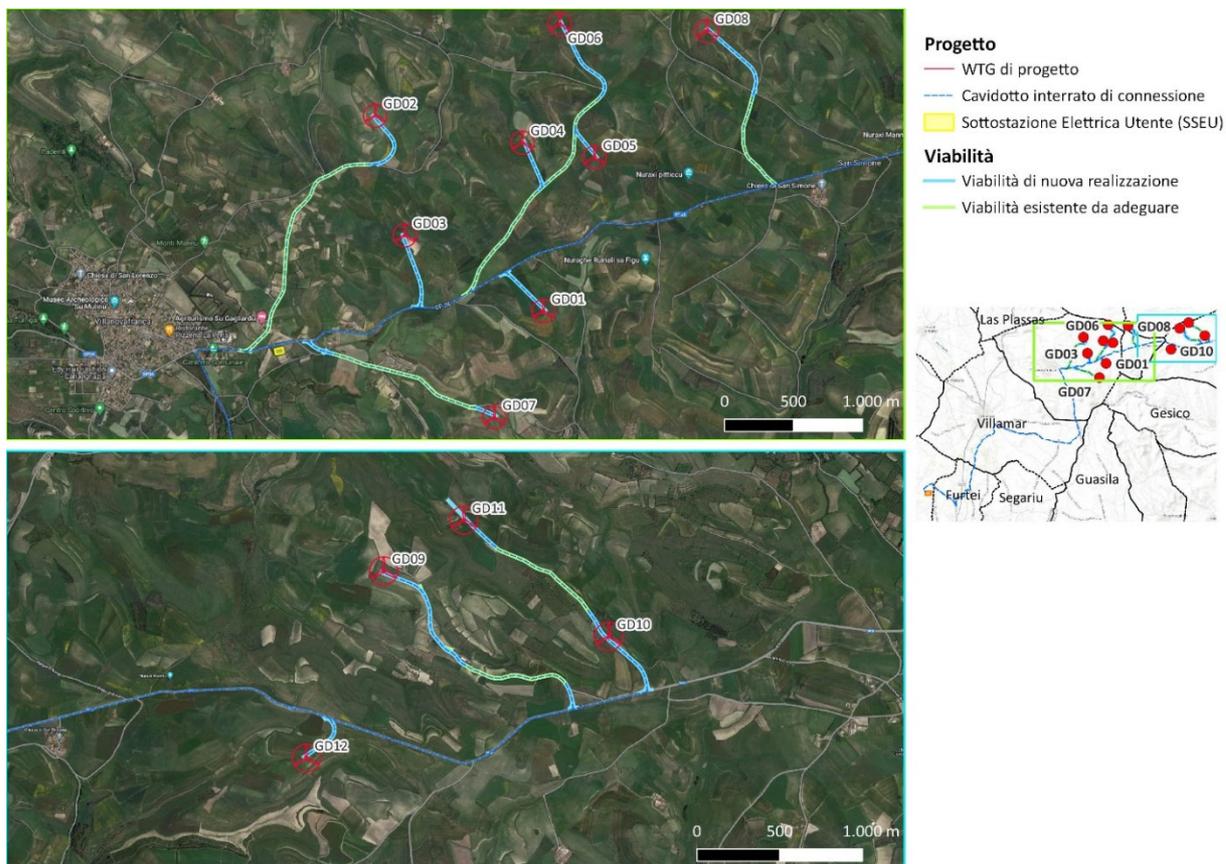


Figura 1.2: Inquadramento della viabilità di progetto.

## 1.2 DESCRIZIONE GENERALE DI PROGETTO

Oggetto della presente relazione è l'analisi della gittata degli elementi rotanti di un aerogeneratore nello specifico "Siemens Gamesa SG 6.0-170". Le principali specifiche tecniche dell'aerogeneratore sono state fornite dal committente e vengono riportate nella seguente tabella:

Tabella 1.2: Caratteristiche tecniche aerogeneratore Siemens Gamesa SG 6.0-170.

| AEROGENERATORE SIEMENS GAMESA SG 6.0 - 170 |   |
|--|---|
| DATI DI FUNZIONAMENTO                      |   |
| Potenza nominale                           | 6000 kW                                       |
| Velocità minima del vento                  | 3.0 m/s                                       |
| Velocità massima del vento                 | 25.0 m/s                                      |
| Classe di vento-IEC                        | III A   |
| ROTORE                                     |   |
| Diametro del rotore                        | 170 m   |
| Area spazzata                              | 22698 m <sup>2</sup>                          |
| Velocità angolare massima                  | 10 giri/min                                   |
| TORRE                                      |   |
| Tipo                                       | torre in acciaio tubolare                     |
| Altezza mozzo                              | 115 m   |
| Altezza al Tip                             | 200 m   |
| PALA                                       |   |
| Lunghezza                                  | 83 m  |
| Numero pale                                | 3   |
| DATI ELETTRICI                             |   |
| Frequenza                                  | 50Hz/60Hz                                     |
| Tipo generatore                            | doubly-fed asynchronous three phase generator |

## 2. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

### 2.1 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.

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.

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.

La parte strutturale posizionata all'interno della pala (longherone) è dotata infatti di attacchi filettati (bulloni prigionieri) che consentono il collegamento della pala al mozzo tramite dadi serrati opportunamente in fase di installazione della turbina (Figura 2.1).

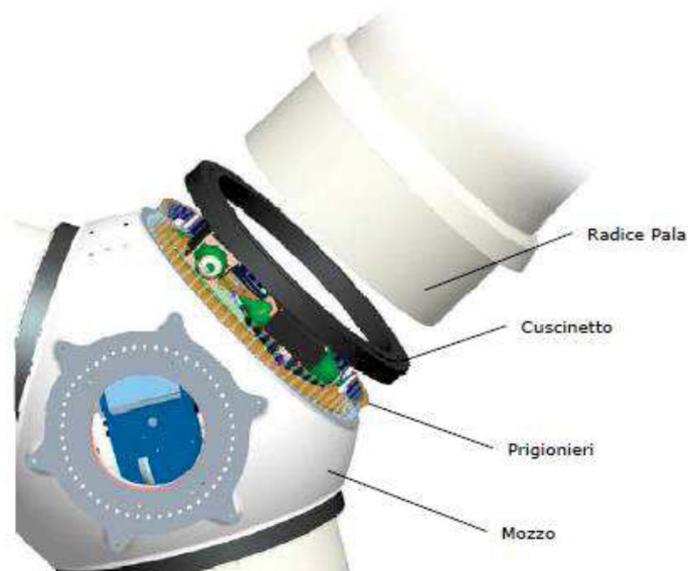


Figura 2.1: particolare mozzo aerogeneratore.

Durante il funzionamento dell'aerogeneratore i bulloni prigionieri offrono una resistenza ai carichi sia statici sia affaticanti che è strettamente legata al precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio in fase di installazione.

Come detto, la giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo costituisce la più probabile "sezione" di rottura e, tra le operazioni di manutenzione programmate per la turbina con cadenza annuale, è previsto un controllo periodico del serraggio dei bulloni e del precarico imposto ai prigionieri finalizzato alla verifica dei valori imposti dal progettista.

C'è da dire che la condizione di carico critica è rappresentata dai carichi affaticanti, che, su base annuale, considerate le velocità massime di rotazione delle turbine, ovvero la frequenza del carico affaticante, in fase di progetto sono tenuti ben al di sotto dei carichi limite di fatica valutati per i bulloni.

Di conseguenza, l'ipotetico distacco di una pala dal rotore potrebbe essere causato da incorretti interventi di manutenzione periodica, durante i quali l'errata verifica delle condizioni di serraggio potrebbero determinare la rottura accidentale di uno o più prigionieri ed al distacco parziale o totale della pala.

È necessario evidenziare come per gli aerogeneratori di nuova generazione ogni pala è fissata al rotore da un numero di bulloni prigionieri compreso tra 50 e 80, pertanto è altamente improbabile l'ipotesi della rottura contemporanea di tutti i prigionieri (condizione che solo in linea teorica comporterebbe il distacco totale della pala). Avrebbe molto più senso, invece, ipotizzare la rottura di un numero limitato (e nemmeno contemporaneo) di bulloni prigionieri. Sotto tale ipotesi, considerando la struttura di un aerogeneratore, l'ancoraggio non perfetto di una delle pale produrrebbe, col moto rotatorio della fase di funzionamento, un disequilibrio e delle oscillazioni indotte all'asse del rotore, fenomeno che porterebbe ad un'immediata risposta da parte dei sistemi di controllo automatici dell'aerogeneratore che in tempi estremamente ridotti ridurrebbero la velocità di rotazione, fino all'arresto, annullando così la possibilità di distacco della pala.



## 2.2 IPOTESI DI CALCOLO

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, considerati i modesti valori delle velocità del vento che interessano l'area di installazione, come deducibile dall'atlante eolico d'Italia (Figura 2.2 e Figura 2.3) ed in particolare dalla mappa delle velocità elaborata da RSE. 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.

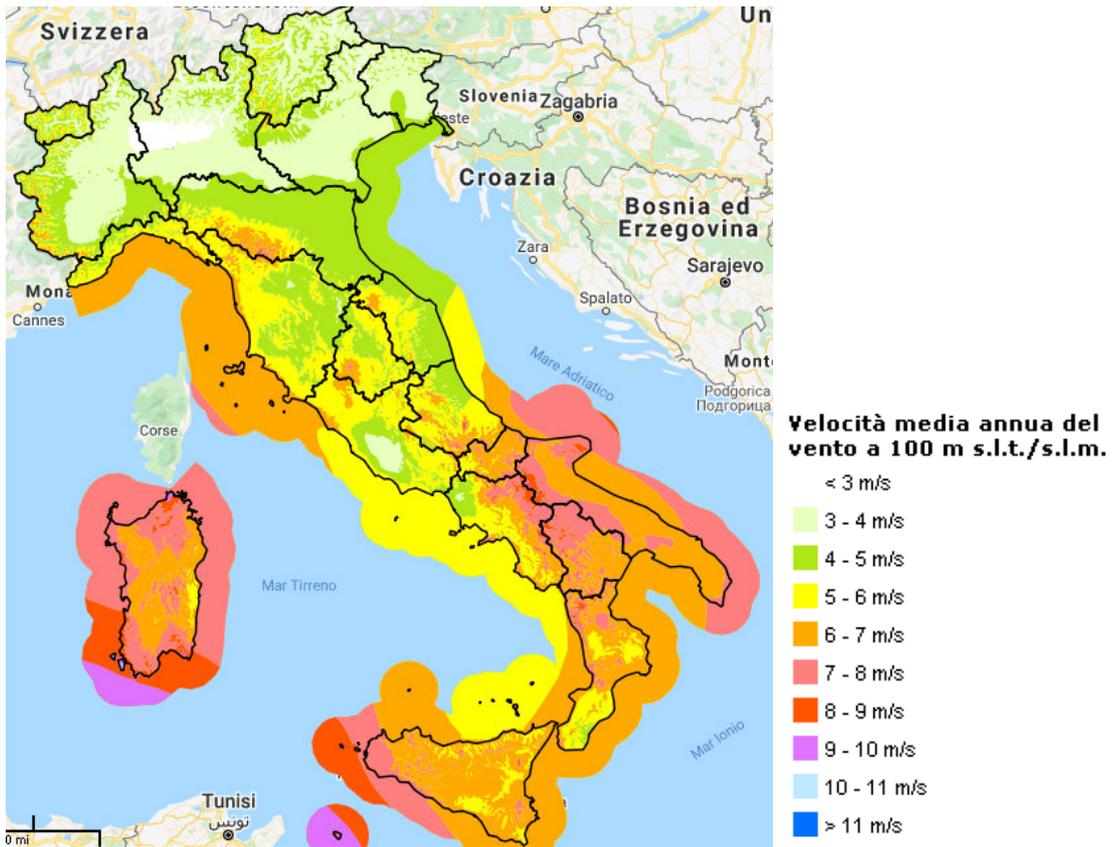


Figura 2.2: Atlante eolico.

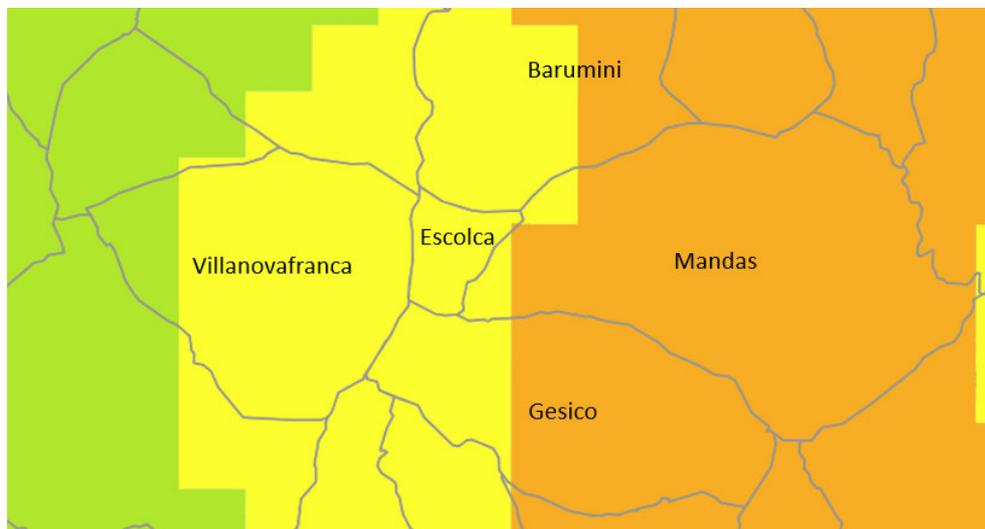


Figura 2.3: Velocità media annua del vento a 100 m slt/slm, nell'area di progetto (Fonte: <https://atlanteolico.rse-web.it/start.phtml>).

## 2.3 FORMULAZIONI

Il seguente metodo di calcolo della gittata è riferito all'aerogeneratore di tipo **Siemens Gamesa SG 6.0-170**.

### *Equazioni del moto*

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

$$x'' = 0$$

$$y'' = -g$$

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

## 2.4 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 ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ad una distanza dal centro di rotazione pari a circa  $r_g = 27,7 \text{ m}$  essendo il diametro del rotore  $D = 170 \text{ m}$  ed il raggio di ciascuna pala  $R = 83 \text{ m}$ .

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 20% la velocità massima del rotore ( $8,83 \text{ giri/minuto}$ ) che considereremo nel calcolo e che verrà pertanto fissata pari a  $8,83 * 1,20 = 10,6 \text{ giri/minuto}$ .

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

$$V_g = \omega r_g = 2\pi n/60 r_g = 30,7 \text{ m/sec}$$

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 pari a 115 m  
 $H = 115,00$  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:

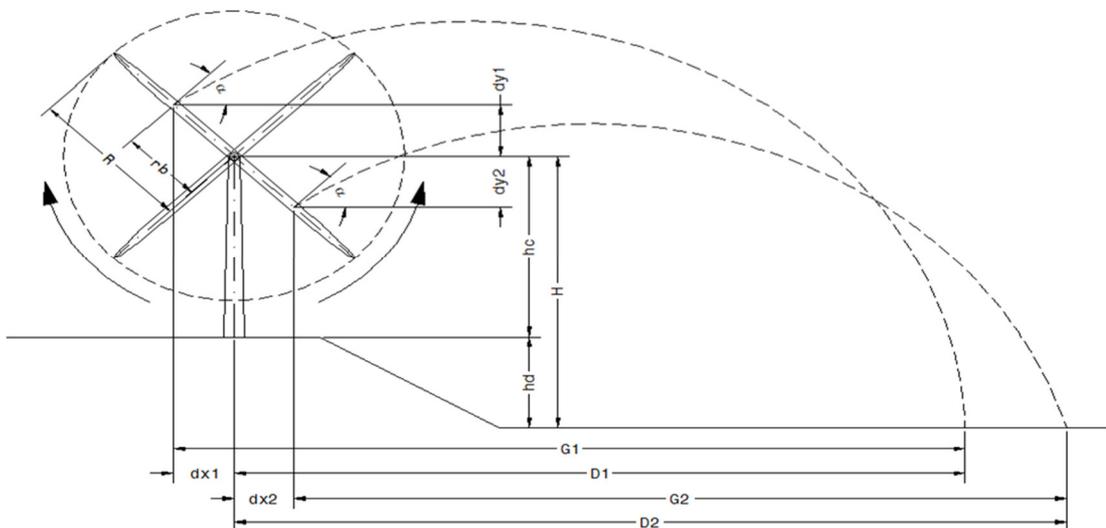
$$V_g = 30,7 \text{ m/s}$$

$$r_g = 27,7 \text{ m}$$

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

$$H = 115 \text{ m}$$

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



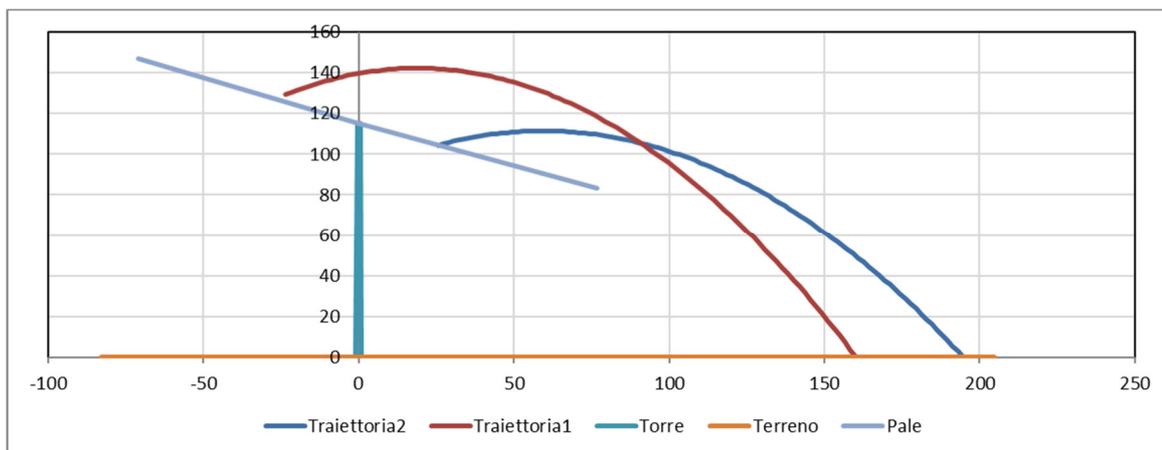


Figura 2.4: Schema grafico della gittata e traiettorie ottenute.

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

Come si evidenzia dal grafico, il valore massimo della gittata per la traiettoria 2 è pari a  $206,4\text{ m}$  circa con un angolo di distacco di circa  $\vartheta = 22^\circ$  circa. La Figura 2.4 mostra 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 in precedenza (incrementando del 20% la velocità angolare massima del rotore).

Il massimo valore della gittata sarà pari al valore calcolato in precedenza,  $194,7\text{ m}$  circa, per  $\vartheta = 22^\circ$  circa. Supponendo di prendere in considerazione sempre quella 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  $(194,7+55,3)\text{ }250,1\text{ m}$ , in cft  $L_{tot} = 250\text{ m}$ .

## 2.5 CASI STUDIO

Di seguito si riporta il calcolo delle gittate per il caso studio:

- **Siemens Gamesa SG 6.0-170** aventi altezza al mozzo pari a 115 m e diametro rotorico pari a 170 m.

Considerati i tipici profili aerodinamici delle pale degli aerogeneratori, si ipotizza il baricentro della pala posizionato ad 1/3 della lunghezza, in prossimità del mozzo.

In Tabella 2.1 si riporta la gittata massima calcolata in riferimento alle formule classiche della cinematica considerando l'ipotesi di moto roto-traslatorio, con rotazione intorno all'asse perpendicolare al piano individuato dal vettore velocità tangenziale (piano ortogonale all'asse del rotore in condizioni di esercizio) e traslazione nello stesso piano, trascurando le forze viscosse (attrito dell'aria), sommando alla gittata l'aliquota corrispondente alla lunghezza della pala dalla parte più lontana dal baricentro verso l'esterno.

Tabella 2.1: Parametri del calcolo della gittata e risultati.

| MODELLO SIEMENS GAMESA SG 6.6-170      |                          |
|--|--------------------------|
| ELEMENTO                               | DIMENSIONE               |
| Lunghezza pala                         | 83.0 [m]                 |
| Velocità rotazione                     | 8.83 [rpm]               |
| Altezza mozzo                          | 115,0 [m]                |
| Posizione baricentro rispetto al mozzo | 27.7 [m]                 |
| Gittata massima                        | 250,1 (194,7 + 55,3) [m] |
| Angolo di distacco                     | 22,5 [°]                 |

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 bassa di quella calcolata in Tabella 2.1, come è possibile osservare dalla Figura 2.5.

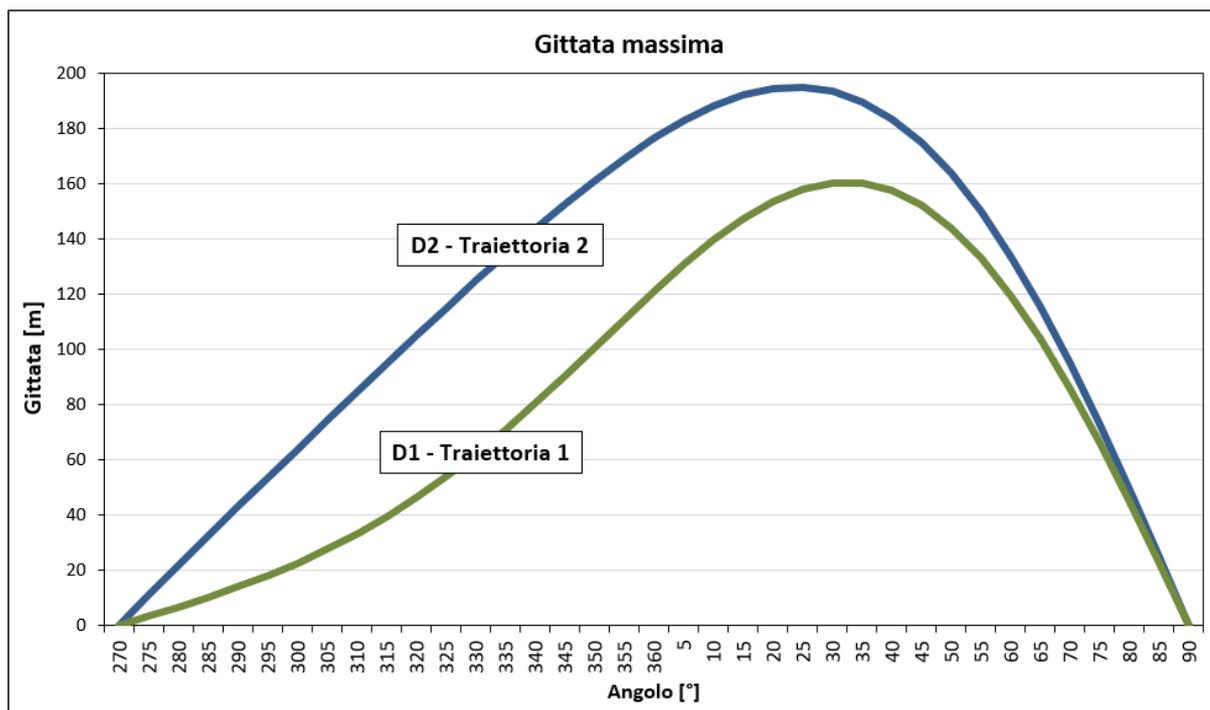


Figura 2.5: Calcolo gittata massima [m] vs. angolo di distacco [°], si rimanda al paragrafo 2.4 per la definizione delle traiettorie.

## 2.6 CONSIDERAZIONI FINALI

Dalle valutazioni effettuate, considerate le ipotesi di campo piano (assenza di variazioni altimetriche del campo di installazione) e moto roto-traslatorio con rotazione intorno all'asse perpendicolare al piano individuato dal vettore velocità tangenziale (piano ortogonale all'asse del rotore in condizioni di esercizio) e traslazione nello stesso piano, si evince un valore della gittata massima pari a circa 194,7 m per un angolo di distacco pari a 22° circa, al quale dovrà aggiungersi la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno della pala, 55,3 m, per un valore complessivo  $L_{tot} = 250,1$  m che precauzionalmente arrotondiamo:

$$L_{tot} = 251 \text{ m.}$$

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.

### 3. APPLICAZIONE DEI RISULTATI ALL'IMPIANTO EOLICO IN OGGETTO

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 del buffer di 251 m dall'asse della WTG in progetto.

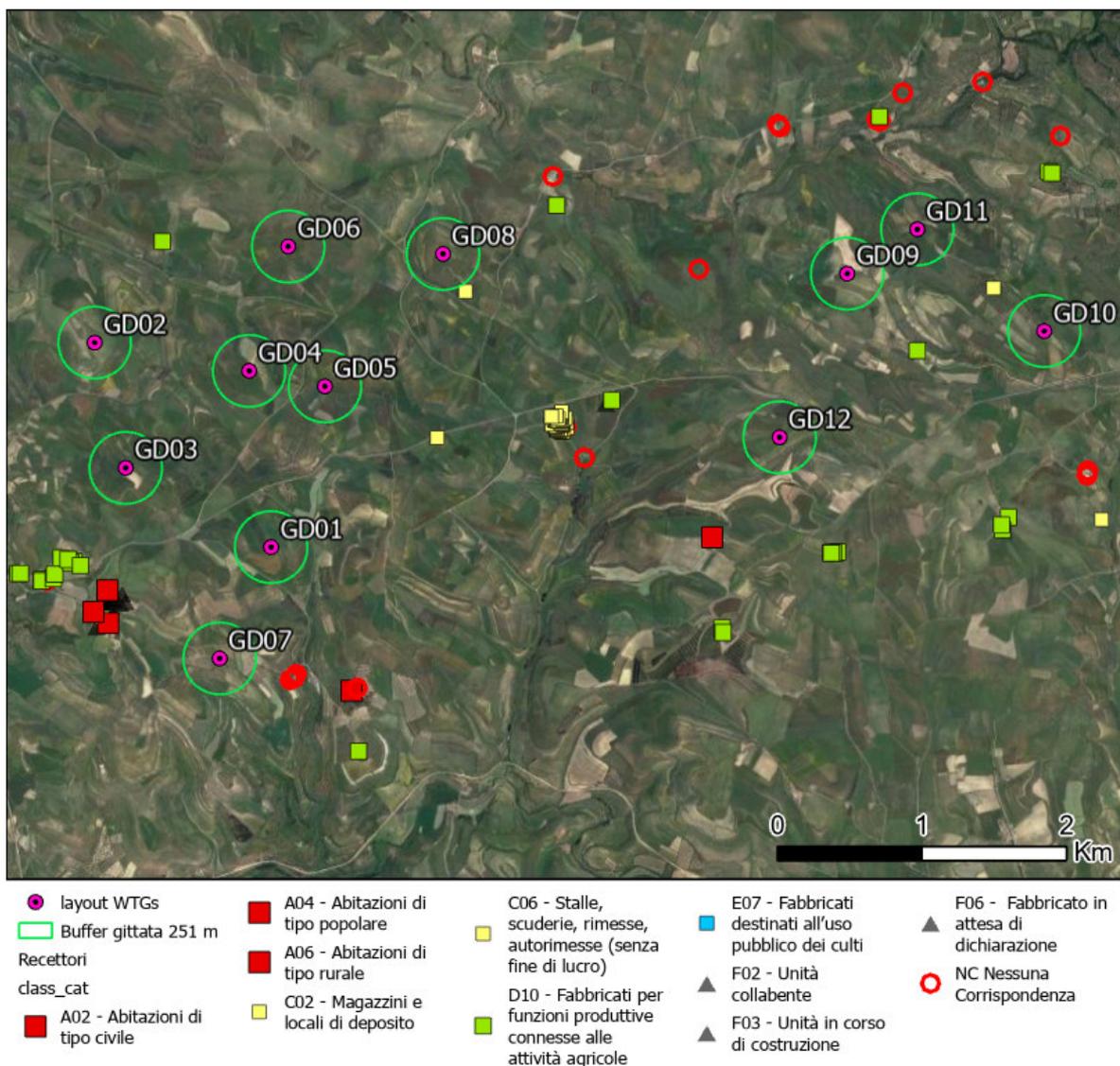


Figura 3.1: Layout di progetto con buffer della gittata massima di distacco di una pala.

Dall'analisi condotta, si evince che all'interno dei buffer non ricade nessun recettore sensibile. Il recettore più vicino alla gittata massima di distacco è posizionato a circa 304 metri dalla GD08, avente categoria catastale C02 – magazzino/locale di deposito.



## 4. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti evidenziano che, per ciascuno dei 12 aerogeneratori del parco eolico, l'ipotetica gittata della pala non interessa alcun recettore sensibile.

Si ritiene inoltre opportuno evidenziare che, considerato il verso di rotazione del rotore 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 degli aerogeneratori oggetto delle valutazioni, una attenta valutazione della direzione ed intensità del vento esistente nell'area di installazione, consente di individuare l'effettiva probabilità di accadimento del distacco dell'intera pala in taluni semipiani, valutata in base ai dati storici disponibili per l'area in esame.

Si fa inoltre presente che il risultato ottenuto dal precedente calcolo è puramente teorico e non prende in considerazione le forze di attrito in gioco che ridurrebbero sensibilmente i valori ottenuti.

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.

Si fa presente infine che il calcolo di gittata di frammenti o porzioni di guscio risulta privo di basi computazionali, in quanto lo stabilire le dimensioni reali del pezzo di guscio distaccato è del tutto aleatorio e non dipende da una causa specifica come quelle collegabili ad una discontinuità, un difetto di progettazione o di realizzazione della pala.

Il caso di distacco di porzioni di pala si potrebbe al più trattare effettuando un'analisi del rischio che è dato dal prodotto fra la probabilità di occorrenza della specifica rottura e la gravità delle conseguenze.

Una simile analisi comporterebbe comunque delle assunzioni arbitrarie fra le quali le dimensioni del pezzo di pala interessato al distacco e uno studio probabilistico sull'occorrenza e la gravità delle conseguenze. Per effettuare queste valutazioni è necessaria la conoscenza di tutta una serie di circostanze circa gli eventi di questo tipo e la base statistica degli eventi incidentali dovrebbe essere notevolmente ampia, la qual cosa non è verificata nella realtà.

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.