

MAGGIO 2024

## **SKI W A4 S.R.L.**

**WIND FARM “CASTELLACCIO” – IMPIANTO EOLICO  
DA 46,2 MW E SISTEMA DI ACCUMULO DA 18 MW**

**LOCALITÀ CASTELLACCIO**

**COMUNE DI FIUMICINO (RM)**

ELABORATI TECNICI DI PROGETTO

## **ELABORATO R11**

## **ANALISI DELLA GITTATA MASSIMA**

**Montana**

### **Progettista**

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

### **Coordinamento**

Eleonora Lamanna

Matteo Lana

Lorenzo Griso

Francesca Casero

*Riccardo Coronati*

### **Codice elaborato**

*2800\_5100\_CST\_PFTE\_R11\_Rev0\_GITTATAMASSIMA*

#### **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)

## Memorandum delle revisioni

Cod. Documento	Data	Tipo revisione	Redatto	Verificato	Approvato
2800_5100_CST_PFTE_R11_Rev0_GITT ATAMASSIMA	05/2024	Prima emissione	<i>VCu</i>	<i>EL</i>	<i>CP</i>

**Visto**

*Il Direttore Tecnico*  
Alberto Angeloni

## Gruppo di lavoro per l'elaborato

Nome e cognome	Ruolo/Temi trattati	Ordine professionale
Matteo Lana	Coordinamento Progettazione Civile	
Andrea Amantia	Geologo - Progettazione Civile	
Vito Maria Cucciniello	Geologo - Progettazione Civile	

### 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 .....	4
1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO .....	4
2. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI.....	8
2.1 DESCRIZIONE GENERALE DI PROGETTO .....	8
2.2 APPROCCIO AL CALCOLO .....	9
2.3 IPOTESI DI CALCOLO .....	10
2.4 VALIDAZIONE PRELIMINARE DEL MODELLO TEORICO.....	11
2.5 FORMULAZIONI .....	13
2.6 CASO STUDIO.....	15
2.7 CONSIDERAZIONI FINALI .....	17
3. APPLICAZIONE DEI RISULTATI ALL'IMPIANTO EOLICO IN OGGETTO .....	18
4. CONCLUSIONI .....	23

## ELABORATI GRAFICI

TAVOLA 01 2800\_5100\_CST\_PFTE\_R11\_T01\_Rev0\_GITTATAMASSIMA



## 1. PREMESSA

Il progetto in esame riguarda la realizzazione di un nuovo Parco Eolico della potenza complessiva di 46,2 MW, che prevede l'installazione di n. **7 aerogeneratori da 6,6 MW**, e di un **sistema di accumulo da 18 MW** da installarsi nel territorio comunale di Fiumicino, in provincia di Roma. Le relative opere di connessione interesseranno i territori del comune di Anguillara Sabazia, Fiumicino e Roma (RM).

La Società Proponente è la SKI W A4 S.R.L., con sede legale in Via Caradosso 9, 20123 Milano (MI).

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 con una nuova stazione elettrica (SE) a 150 kV della RTN, da inserire in entra - esce sulla linea RTN a 150 kV "Cesano - Crocicchie". Ai sensi dell'art. 21 dell'allegato A alla deliberazione Arg/elt/99/08 e s.m.i. dell'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente, il nuovo elettrodotto a 150 kV per il collegamento della centrale sulla Stazione Elettrica della RTN costituisce l'impianto di utenza per la connessione, mentre lo stallo arrivo del produttore a 150 kV nella suddetta stazione costituisce l'impianto di rete per la connessione.

Nel suo complesso il parco di progetto sarà composto:

- da n° 7 aerogeneratori della potenza nominale di 6,6 MW ciascuno;
- di un sistema di accumulo da 18 MW
- dalla viabilità di servizio interna realizzata in parte ex-novo e in parte adeguando strade comunali e/o agricole esistenti;
- dalle opere di collegamento alla rete elettrica;
- dalle opere di regimentazione delle acque meteoriche;
- dalle reti tecnologiche per il controllo del parco.

A tal fine il presente documento costituisce l'**Analisi della Gittata Massima** del progetto.

### 1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO

Le opere di progetto si estendono nella provincia di Roma secondo la seguente configurazione:

- n.7 aerogeneratori territorialmente tutti collocati nel territorio comunale di Fiumicino (Figura 1.1).;
- n.1 sistema di accumulo (BESS) collocato nel territorio comunale di Roma, in prossimità della Sottostazione Elettrica Utente (Figura 1.2);
- il cavidotto interrato di connessione MT 30 kV collocato nei territori comunali di Anguillara Sabazia, Fiumicino e Roma (Figura 1.1);
- il cavidotto interrato di connessione AT 150 kV collocato nel territorio comunale di Roma (Figura 1.1);
- la cabina di smistamento collocata nel territorio comunale di Anguillara Sabazia (Figura 1.1);

- la Nuova Stazione Elettrica (SE) Terna collocata nel territorio comunale di Roma (Figura 1.1).

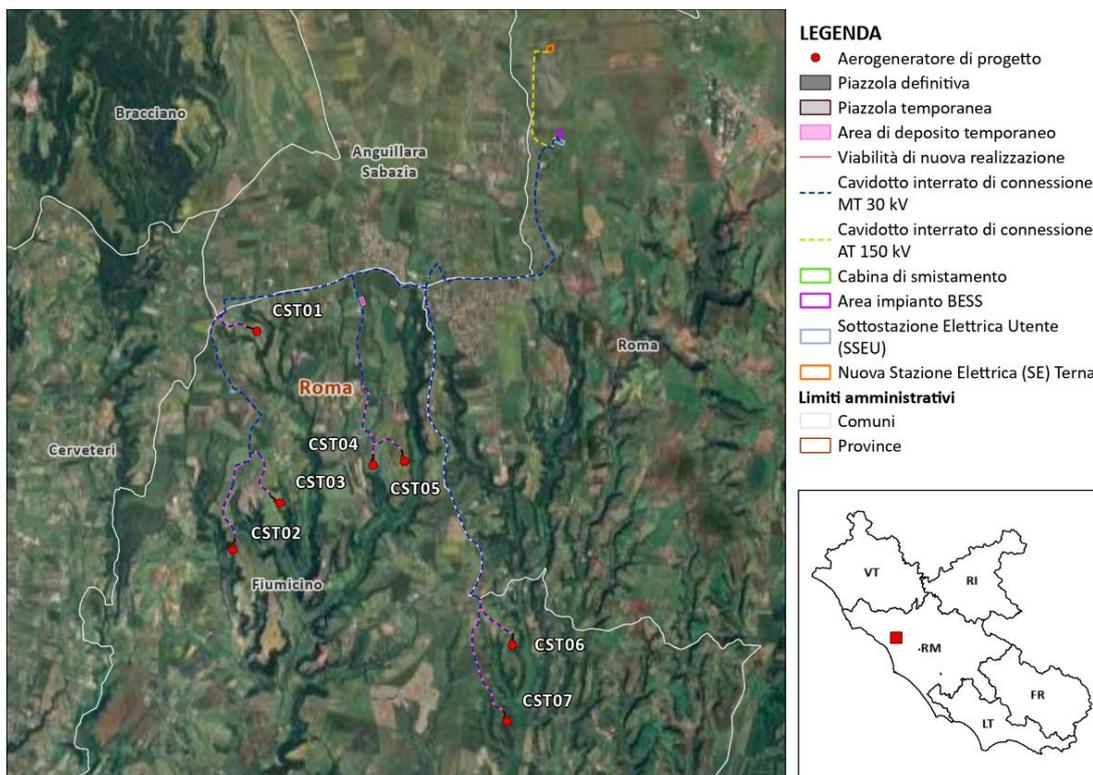


Figura 1.1: Localizzazione a scala regionale, provinciale e comunale dell'impianto proposto

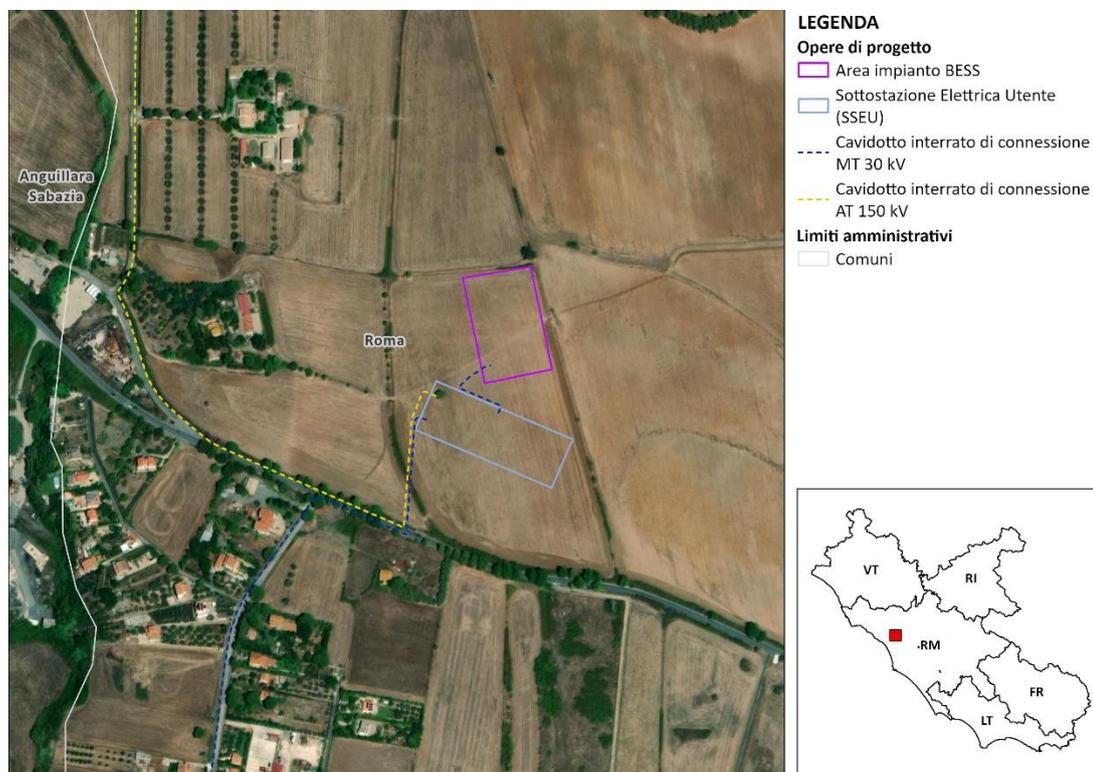


Figura 1.2: Inquadramento dell'Area di impianto BESS e Sottostazione Elettrica Utente (SSEU)

Le coordinate degli aerogeneratori previsti sono riportate in Tabella 1.1.

Tabella 1.1: Coordinate aerogeneratori - WGS 1984 (Gradi decimali)

AEROGENERATORI	WGS 84 – GRADI DECIMALI	
	Longitudine E	Latitudine N
CST01	12,210347	42,011799
CST02	12,204052	41,980573
CST03	12,213526	41,986984
CST04	12,231685	41,991958
CST05	12,237686	41,992375
CST06	12,257021	41,965368
CST07	12,255384	41,954316

L'accesso al sito avverrà mediante strade esistenti a carattere nazionale e regionale partendo dal porto di Livorno (LI) fino ad arrivare all'area di progetto. Successivamente, le principali strade provinciali e comunali del territorio, in aggiunta alle piste appositamente create, permetteranno di collegare le singole piazzole di ciascuna torre con la viabilità pubblica esistente (Figura 1.3 e Figura 1.4).

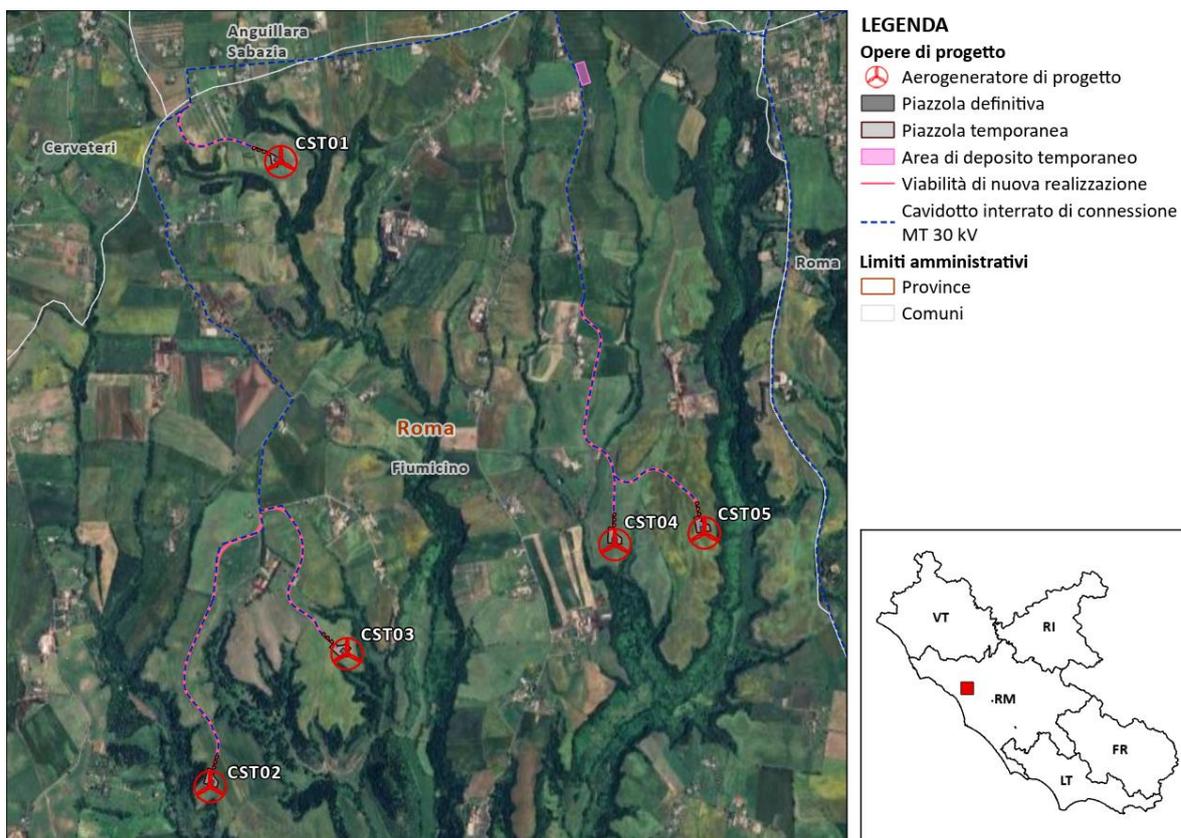


Figura 1.3: Inquadramento della viabilità di progetto nella parte nord del layout

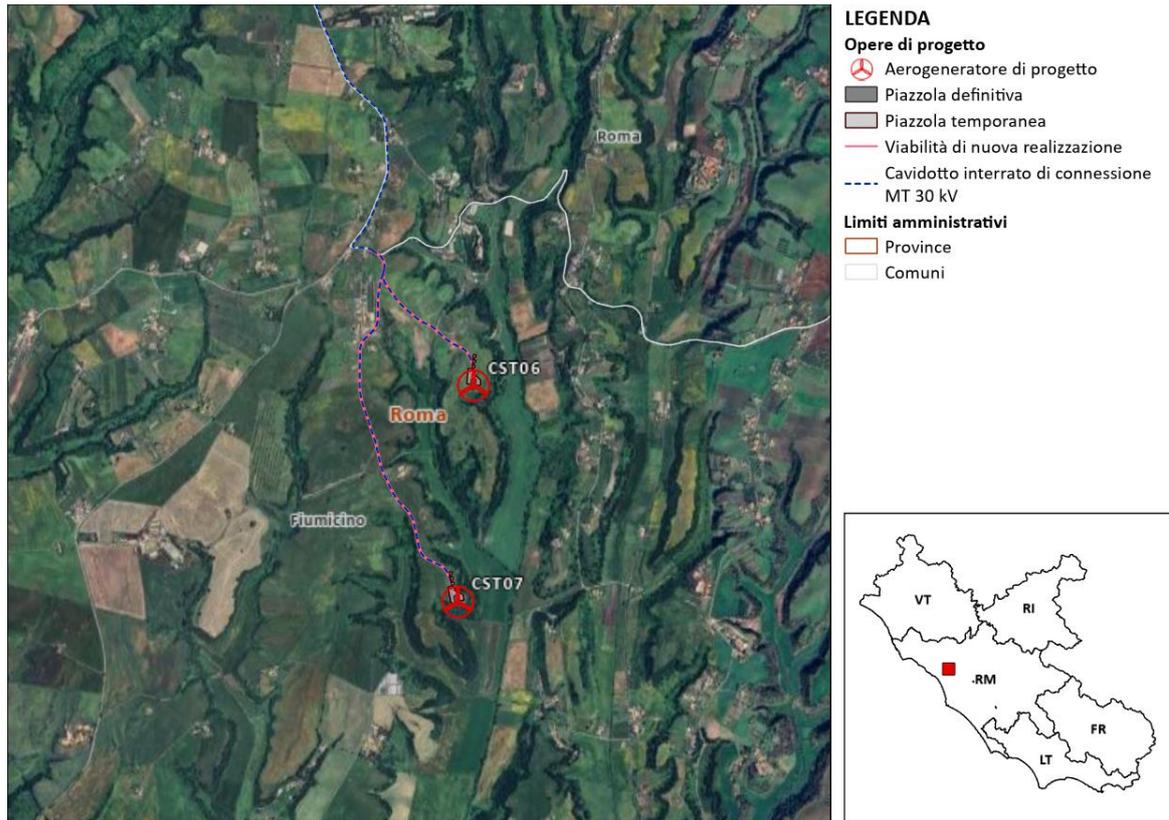


Figura 1.4: Inquadramento della viabilità di progetto nella parte nord del layout

## 2. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

### 2.1 DESCRIZIONE GENERALE DI PROGETTO

Oggetto della presente relazione è l'analisi della gittata degli elementi rotanti di un aerogeneratore con le specifiche progettuali di base dell'aerogeneratore riportate di seguito:

- Produttore: generico;
- tipo generatore: generico;
- potenza nominale: 6,6 MW.
- h hub:  $\leq 135$  m;
- diametro rotore:  $\leq 175$  m;
- h max: 220.

Da una accurata indagine dei prodotti attualmente in commercio, si è scelto di analizzare la turbina VESTAS ENVENTUS V 172 perché presenta le caratteristiche che forniscono la gittata massima tra le turbine con caratteristiche che soddisfano i requisiti sopra riportati<sup>1</sup>.

Nella sottostante tabella si riassumono le principali caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore utilizzato nei calcoli.

Tabella 2.1: Caratteristiche tecniche aerogeneratore.

AEROGENERATORE VESTAS ENVENTUS V 172	
<b>DATI DI FUNZIONAMENTO</b>	
Potenza nominale	7.200 kW depotenziata a 6.600 kW
Velocità minima del vento	3 m/s
Velocità massima del vento	25.0 m/s
<b>ROTORE</b>	
Diametro del rotore	172 m
Area spazzata	23235 mq
Velocità massima	12 giri/min
<b>TORRE</b>	
Tipo	Torre in acciaio tubolare
Altezza mozzo	134 m
Altezza al Top	220 m
<b>PALA</b>	
Lunghezza	da 84.35m
Numero pale	3
Materiale	G (Glassfiber) – CRP (Carbon Reinforced Plastic)

Esemplificandone l'ingegneria, si osserva che le pale dell'aerogeneratore sono fissate su un mozzo, nell'insieme costituiscono il rotore, il mozzo, a sua volta, è collegato ad un albero di trasmissione che ruota alla stessa velocità angolare del rotore.

<sup>1</sup> SIEMENS GAMESA SG 6.6-170; NORDEX N175/6.X.

Tutti i componenti sopra menzionati, ad eccezione, del rotore e del mozzo, sono ubicati entro una cabina, detta navicella la quale, a sua volta, è sistemata su un supporto-cuscinetto, in maniera da essere facilmente orientata secondo la direzione del vento (Figura 2.1).



Figura 2.1: Rappresentazione di un aerogeneratore.

## 2.2 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 ed al diametro del rotore. Ai fini del calcolo vengono impiegate, in via preliminare, le formule classiche della cinematica di un 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, del 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).

Inoltre, 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.

Tuttavia, con DM 10/9/2010, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale, serie generale, n° 219 del 18/9/2010, il MISE ha emanato a suo tempo le "Linee guida per il procedimento di cui all'articolo 12 del decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387 per l'autorizzazione alla costruzione e all'esercizio di impianti di produzione di elettricità da fonti rinnovabili nonché linee guida tecniche per gli impianti stessi" (d'ora in poi Linee Guida Nazionali), in applicazione del citato comma 10 dell'art. 12 del D.lgs. N°387/03; tra le

quali è prevista per le pale eoliche, uno studio sulla gittata massima degli elementi rotanti nel caso di rottura accidentale.

Nel calcolo per la gittata massima è da considerare che la conformazione del profilo alare dell'aerogeneratore è fissa, mentre è mobile il rotore sul quale sono ancorate le pale. Questo garantisce il fatto che il rotore possa orientarsi rispetto al vento in modo tale da offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo indipendentemente dalla direzione del vento un verso orario di rotazione. Tale considerazione è utile per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale ed a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano.

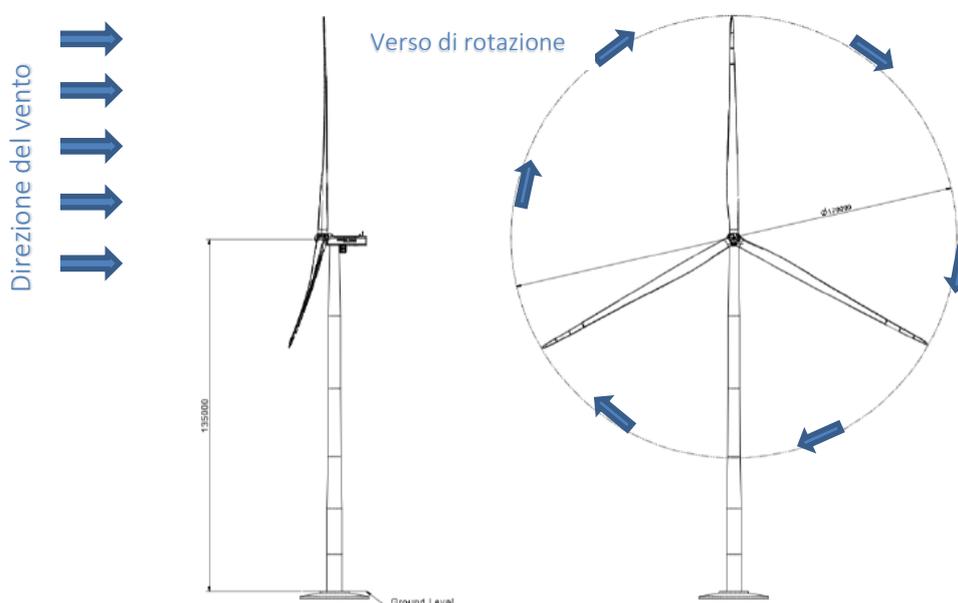


Figura 2.2: Schematizzazione Verso di Rotazione / Direzione del vento.

Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva e quindi si può determinare la direzione lungo la quale l'eventuale pala o parte di essa che si distacca percorre il suo moto.

Infine, mettendo in relazione la traiettoria del corpo che si distacca con la corografia del luogo è possibile verificare se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può essere o meno un elemento di pericolo per gli edifici più prossimi.

### 2.3 IPOTESI DI CALCOLO

Per il calcolo della gittata massima si utilizza il foglio di calcolo pubblicato e reso disponibile sul portale della Regione Campania predisposto per le istruttorie per gli impianti di produzione di energia da fonte rinnovabile eolica dalla "Unità Operativa Dirigenziale 500203 - Energia, efficientamento e risparmio energetico, Green Economy e Bioeconomia" della medesima Regione Campania.

Il calcolo della gittata massima delle pale eoliche si basa sulle seguenti assunzioni:

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



- 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 in quanto 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.

## 2.4 VALIDAZIONE PRELIMINARE DEL MODELLO TEORICO

In bibliografia internazionale sono pochi gli studi per il calcolo della gittata sviluppati con modelli complessi che tengano conto di parametri quali la distribuzione della rosa dei venti locale, gli attriti che entrano in gioco nella fase di volo e la massa dello spezzone di ala, nonché la possibile imbardata della pala durante il volo, tutti parametri che tendono a ridurre significativamente il calcolo teorico proposto.

Ancora più difficile trovare modelli di calcolo opportunamente validati ed affidabili; in tal senso, ci si può comunque riferire agli studi di calcolo della gittata proposti da alcuni costruttori di WTG, nello specifico si prendono in esame due studi (di seguito indicati come caso a e caso b):

- a) Il primo eseguito dalla PB Power Ltd per conto della società Vestas Wind System dal titolo "*VESTAS V80 – Blade throw calculation under normal operating conditions*" (2001). Questo studio, sebbene datato, risulta essere tra i più completi ad oggi disponibili;
- b) Il secondo, dal titolo "*Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento*", è un Technical Report Rev.13 del 2014 prodotto dalla VESTAS. Questo studio, più recente, affina i modelli teorici utilizzati da Vestas rispetto al precedente.

In entrambi gli studi, il moto della parte distaccata è considerato come un moto rotazionale, su cui agisce anche la forza di gravità. La resistenza offerta dalla pala al moto, sia *in plane* che *out plane*, è generata dalla rotazione intorno agli assi xx e yy.

Gli studi considerano che la massima gittata della pala/frammento di pala è strettamente dipendente:

- dal numero di giri del rotore e, quindi, dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;
- dalla posizione della pala nel momento del distacco;
- dalla dimensione del frammento;
- dal peso del frammento (più leggero è, più il suo moto è limitato dalle forze di attrito viscoso);
- dal profilo aerodinamico della pala/frammento di pala.

In entrambi i casi, per ragioni commerciali Vestas non produce il dettaglio delle formule utilizzate nei loro calcoli.

Il caso a) considera due aerogeneratori, in questa sede genericamente denominati TIPO XX ed aventi caratteristiche diverse:



- aerogeneratore TIPO 1 con una pala di lunghezza pari a 39 m e una velocità di rotazione massima a regime di 19,2 rpm posto su una torre di altezza pari a 67 m;
- aerogeneratore TIPO 2 con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 rpm posto su una torre di altezza pari a 80 m.

Per la prima tipologia di aerogeneratore è stato fatto uno studio completo ipotizzando tre condizioni:

- la prima più conservativa, che include solo le forze di inerzia ed esclude le forze viscosi;
- la seconda che include le forze viscosi;
- la terza che considera il moto della pala completo (moto rotazionale complesso).

La velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della pala:

- per l'aerogeneratore di TIPO 1 è pari a 20 giri/min;
- per l'aerogeneratore di TIPO 2 è pari a 16,39 giri/min.

Nel caso b) viene presentato uno studio su 10 aerogeneratori ipotizzando tre condizioni:

- la prima più conservativa, che include solo le forze d'inerzia ed esclude le forze viscosi, a cui corrisponde una gittata maggiore;
- la seconda, che include le forze viscosi, a cui corrisponde una gittata circa del 20% in meno rispetto alla prima;
- la terza, che considera il moto della pala completo, a cui corrisponde una gittata ancora più piccola.

Per questo specifico studio si riportano solo i risultati degli aerogeneratori più potenti e con altezze maggiori, più simile quindi a quelli attualmente sul mercato, qui denominati:

- AEROGENERATORE TIPO 3 con una pala di lunghezza pari a 57,15 m e una velocità di rotazione massima a regime di 17,7 RPM posto su una torre di altezza pari a 91.5 m (116.5 m);
- AEROGENERATORE TIPO 4 con una pala di lunghezza pari a 61,66 m e una velocità di rotazione massima a regime di 16,5 RPM posto su una torre di altezza pari a 117 m (137 m).

In sintesi, i risultati ottenuti a suo tempo nel caso a) sono stati i seguenti:

- per l'aerogeneratore di TIPO 1 considerando un moto rotazionale complesso (condizione 3), la gittata risulta pari a circa 110 m; per l'aerogeneratore di TIPO 1 considerando gli effetti delle forze viscosi (condizione 2), la gittata risulta pari a circa 113 m;
- per l'aerogeneratore di TIPO 1, considerando il caso semplificato che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosi, la gittata risulta pari a 131,6 m.

Per l'aerogeneratore di TIPO 2 è stato effettuato solo il calcolo nella condizione 1, escludendo le forze viscosi e non considerando la complessità del moto, ottenendo un valore per la gittata di 108 m.

Altresì, i risultati ottenuti a suo tempo nel caso b) sono stati i seguenti:

- per l'aerogeneratore di TIPO 3, considerando il caso semplificato che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosi, la gittata risulta pari a 145 m;
- per l'aerogeneratore di TIPO 4, considerando il caso semplificato che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosi, la gittata risulta pari a 150 m.

I risultati in termini di gittata dei modelli teorici di Vestas più cautelativi (gittate massime) sono quindi stati confrontati con i risultati del modello teorico predisposto dalla "Unità Operativa Dirigenziale 500203 - Energia, efficientamento e risparmio energetico, Green Economy e Bioeconomia" della Regione Campania (Tabella 3.2), utilizzando i medesimi dati di input per il calcolo.

I valori di gittata teorici calcolati dimostrano che il modello di calcolo proposto dalla Regione Campania ed utilizzato da Montata nella presente relazione, non tengono conto di alcun tipo di attrito o



complessità del moto aereo; pertanto, sebbene irrealizzabili nella realtà, a livello teorico sono sempre più alti di quelli calcolati da Vestas, a favore quindi della sicurezza e salvaguardia di persone o cose (Tabella 2.2).

Tabella 2.2: Confronto delle gittate

CASO	NOTE	GITTATA EFFETTIVA CALCOLATA DA VESTAS	GITTATA EFFETTIVA CALCOLATA CON IL MODELLO DELLA REGIONE CAMPANIA
VESTAS CASO 1	Caso conservativo che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosse	131,6 m	173,1 m
VESTAS CASO 2	Caso conservativo che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosse	108 m	156 m
VESTAS CASO 3	Caso conservativo che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosse	145 m	237 m
VESTAS CASO 4	Caso conservativo che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosse	150 m	257 m

## 2.5 FORMULAZIONI

Il seguente metodo di calcolo della gittata è riferito all'aerogeneratore generico le cui caratteristiche di calcolo sono riportate in tabella 2.3.

### Equazioni del moto

Il calcolo della Gittata è effettuato in funzione dell'angolo di inclinazione della pala rispetto all'orizzontale, in senso orario e ponendo l'angolo di 0° tra il 3° e 4° quadrante.

La formula [1] per il calcolo della Gittata Massima (G) per angoli compresi tra 0° e 90° è la seguente:

$$G = \frac{v_{x0}(v_{y0} + \sqrt{v_{y0}^2 + 2 * g * HG})}{g} - X_g$$

dove:  $\alpha$  = Angolo della pala rispetto all'orizzontale (che corrisponde all'angolo tra 91° e 180° dell'angolo velocità)

$$HG = H_{torre} + Y_g$$

$$Y_g = rg \sin \alpha$$

$rg$  = posizione del baricentro pari ad 1/3 della lunghezza della pala più raggio mozzo

$X_g = rg \cos \alpha$  - posizione del baricentro della pala rispetto all'asse della torre

$$v_{x0} = v_0 \cos (90 - \alpha) = v_0 \sin \alpha$$

$$v_{y0} = v_0 \sin (90 - \alpha) = v_0 \cos \alpha$$

$$v_0 = \omega rg = (2\pi n rg)/60$$

$n$  = numero di giri al minuto del rotore

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$  è l'accelerazione di gravità.

Da cui si calcola la Gittata effettiva ( $G_{\text{eff}}$ ) dalla formula:

$$G_{\text{eff}} = G + L_g$$

dove:  $L_g = \frac{2}{3} L$

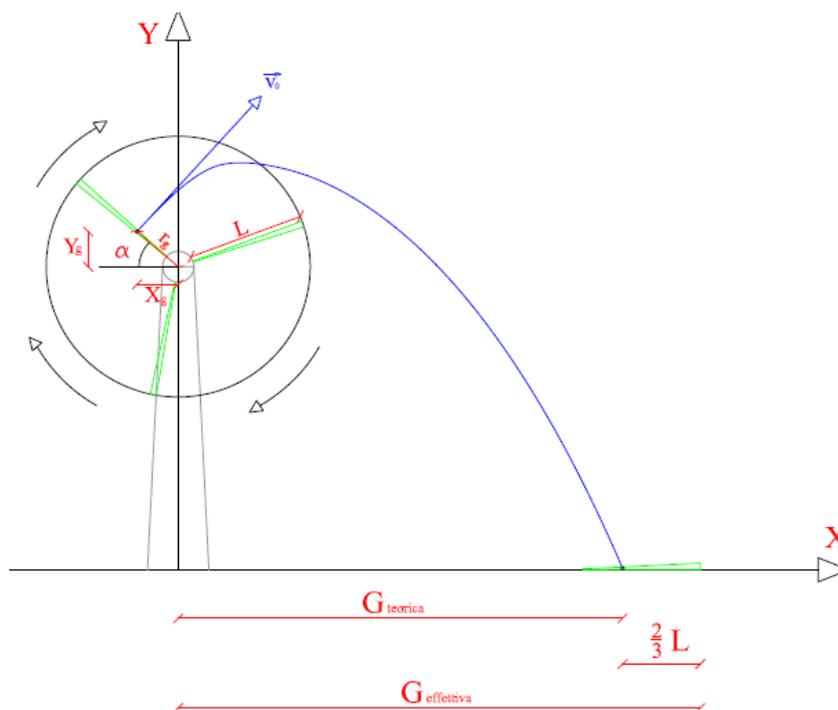


Figura 2.3: Schema della Gittata per angolo compreso tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

La formula [2] per il calcolo della Gittata Massima ( $G$ ) per angoli compresi tra  $270^\circ$  e  $260^\circ$  è la seguente:

$$G = \frac{v_{x0}(v_{y0} + \sqrt{v_{y0}^2 + 2 * g * HG})}{g} + X_g$$

Dove rispetto quanto sopra:  $v_{x0}$  è negativo perché verso sinistra, quindi  $G$  sarà negativo (Figura 2.5)

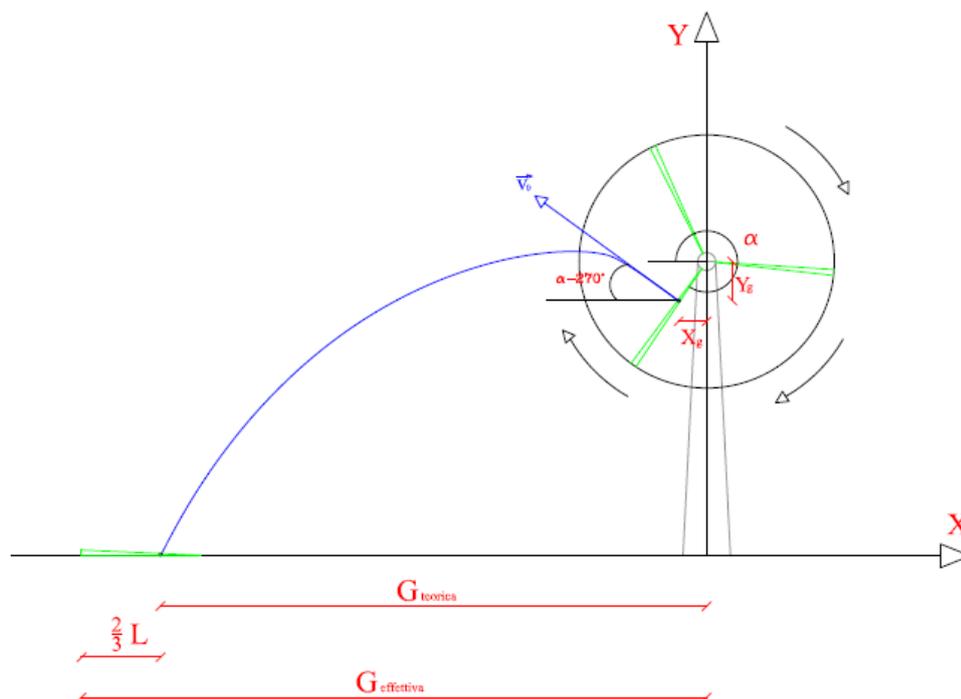


Figura 2.4: Schema della Gittata per angolo compreso tra 270° e 360°.

## 2.6 CASO STUDIO

Di seguito si riporta il calcolo delle gittate per il caso studio, in Tabella 2.1 si riportano i principali parametri geometrici riportati dal costruttore e utilizzati per il calcolo della gittata.

Tabella 2.3: Parametri del calcolo della gittata e risultati.

MODELLO GENERICO AEROGENERATORE	
ELEMENTO	DIMENSIONE
Lunghezza pala	84.35 [m]
Velocità rotazione massima	12 [rpm]
Altezza mozzo	134,0 [m]
Posizione baricentro rispetto al mozzo	29.7 [m]
Diametro del rotore	172 [m]

In Tabella 2.4 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 (riferimento le formule [1] e [2] del paragrafo 2.5). Si considerano trascurabili le forze viscosi (attrito dell'aria) e si ipotizza il baricentro della pala posizionato ad 1/3 della lunghezza, in prossimità del mozzo.

Tabella 2.4: Risultati del calcolo della gittata

PARAMETRO CALCOLATO	[1] ANGOLI COMPRESI TRA 0° E 90°	[2] ANGOLI COMPRESI TRA 270° E 360°
Angolo $\alpha$	66°	306°
V0	37,4 m/s	37,4 m/s
Vx0	34,25 m/s	-30,7 m/s
Vy0	15,2 m/s	21,5 m/s
Gittata teorica	243.83 m	-243.83 m
Lg	56.23 m	56.23 m
Gittata Effettiva	300.06 m	- 300.06 m

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 corrispondenti ad  $\alpha = 90^\circ$ , dove gli sforzi di flessione sono massimi, ed ad  $\alpha = 180^\circ$ , dove è massimo il contributo gravitazionale:

- gli sforzi di flessione a cui è soggetta la pala sono massimi per  $\alpha=90^\circ$  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  $\alpha = 180^\circ$  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. In condizioni di massima sollecitazione per i bulloni di serraggio della pala, quindi per  $\alpha = 90^\circ$  e  $\alpha = 180^\circ$ , rispettivamente a flessione e trazione, i valori della gittata massima potrebbero essere decisamente più bassi rispetto a quelli calcolati in Tabella 2.4, come è possibile osservare dalla Figura 2.5.

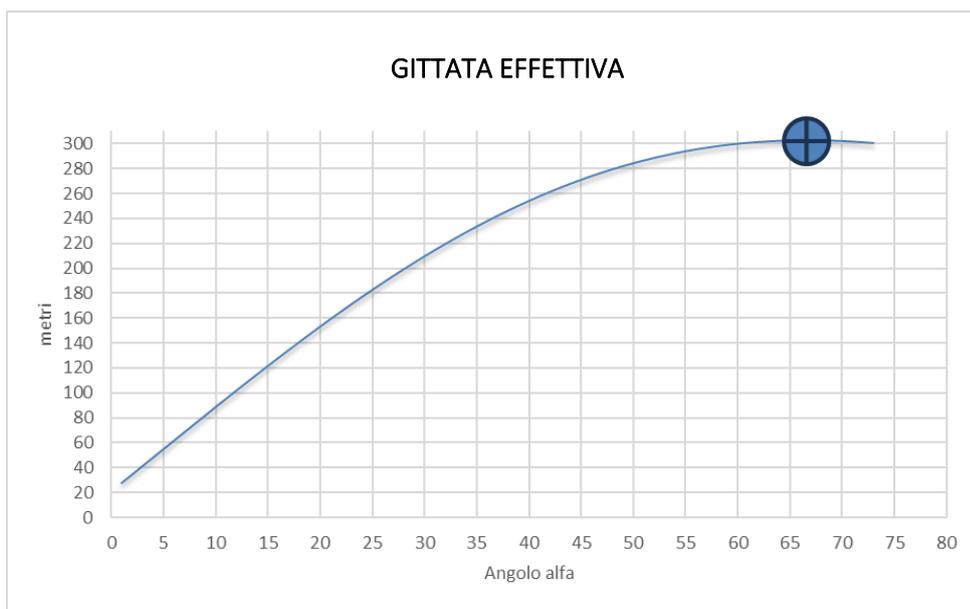


Figura 2.5: Calcolo Gittata Effettiva vs. angolo di distacco [°], si rimanda al paragrafo 3 per la definizione delle traiettorie.



## 2.7 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, considerando un modello di aerogeneratore con velocità massima pari a 12 giri/min, si evince un valore della gittata massima pari a circa 243.83 m per un angolo di distacco pari a 66° circa, al quale dovrà aggiungersi la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno della pala, ovvero 56.23 m, per un valore complessivo precauzionalmente arrotondato in +1%, ovvero in:

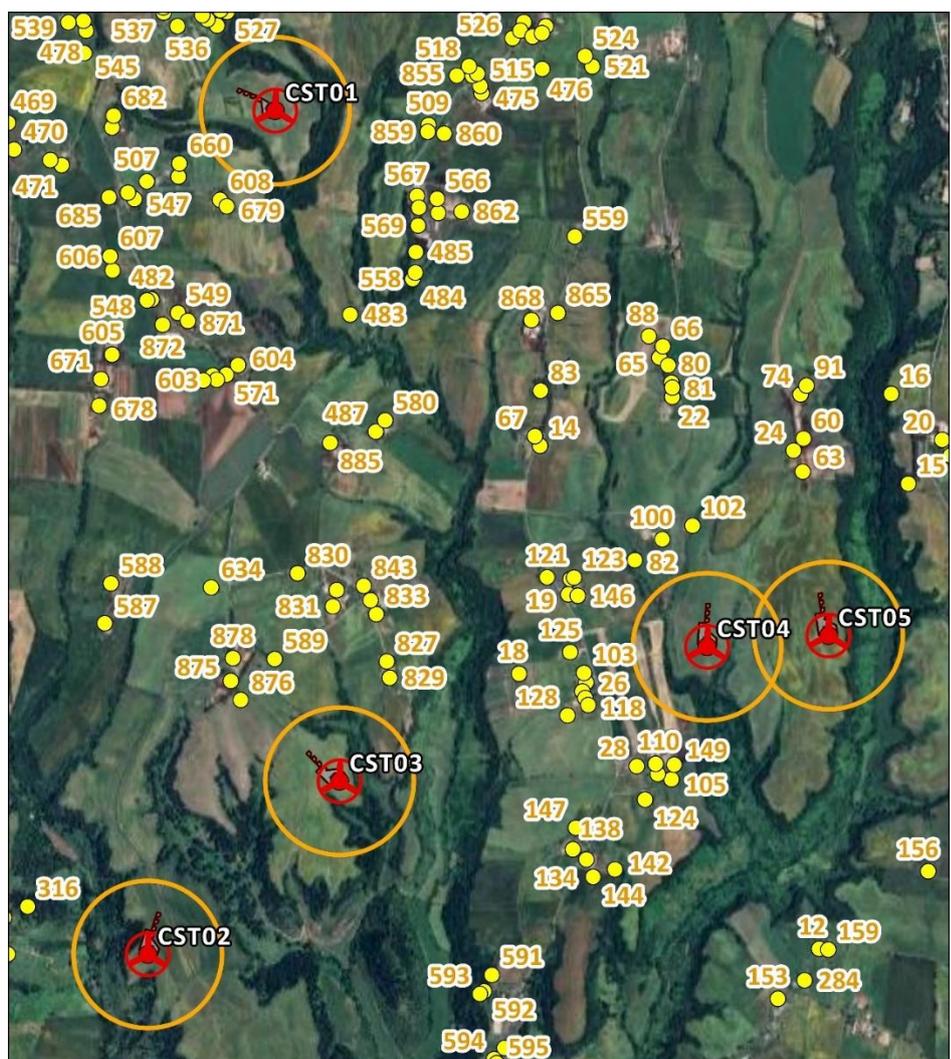
$$G_{\text{eff}} = 303 \text{ m}$$

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.

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

I risultati del calcolo per la Gittata Massima Effettiva vengono analizzati in relazione alla presenza di potenziali recettori presenti nelle aree circostanti gli aerogeneratori in progetto.

Nello specifico studio, si verifica l'assenza di recettori quali edifici/fabbricati di qualsiasi genere e strade comunali, provinciali e statali all'interno di un buffer di 303 m dall'asse degli aerogeneratori stessi (da Figura 3.1 a Figura 3.4).

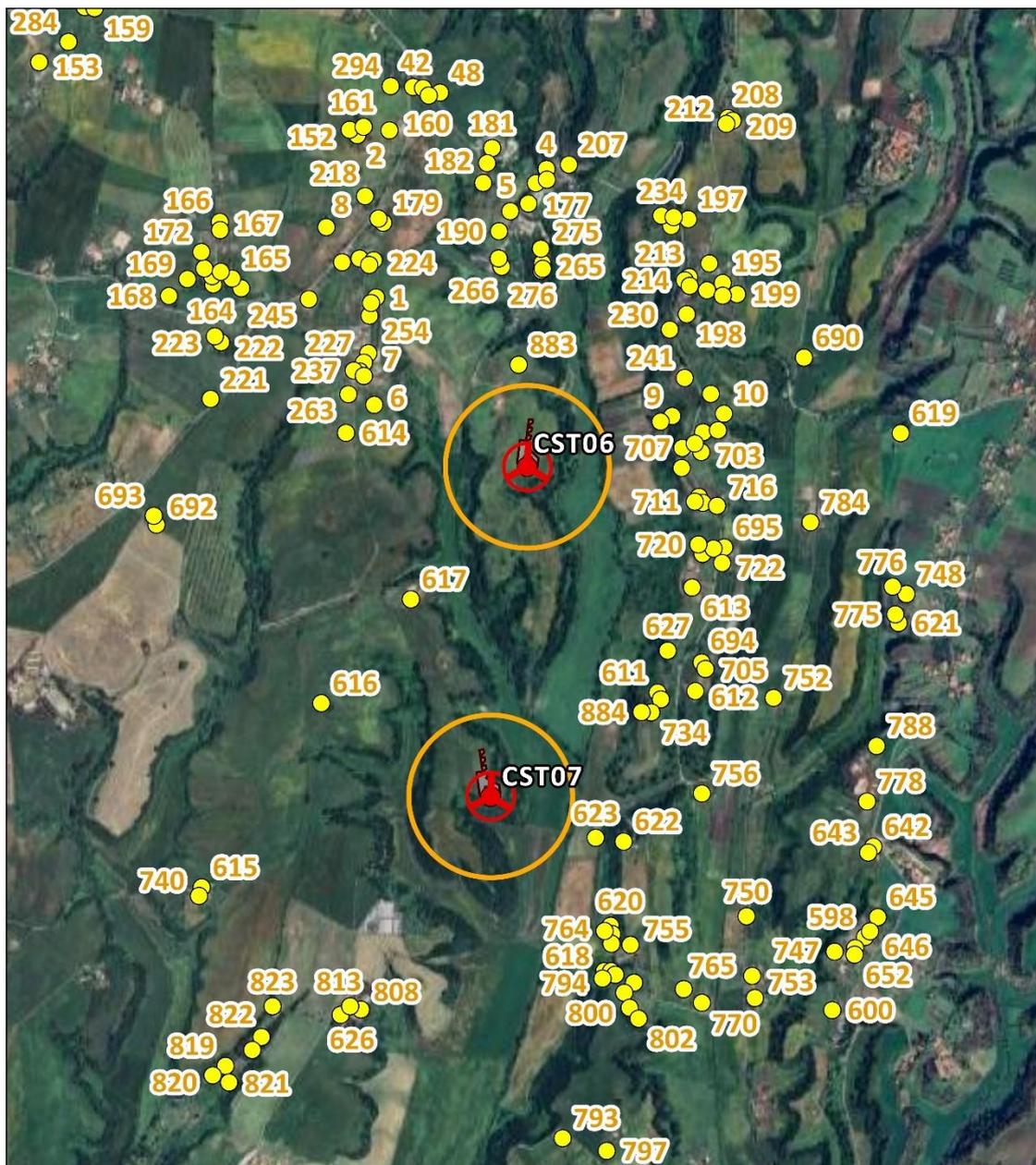


-  Gittata massima 303 m
-  Aerogeneratore di progetto - sorvolo
-  Aerogeneratore di progetto
-  Piazzola definitiva
-  Piazzola temporanea
-  Recettori

0 0,3 0,6 1,2 Kilometers



Figura 3.1: - Layout di progetto con buffer della gittata massima di distacco di una pala – Torri CST01÷CST05 CST05 – interferenze con recettori.

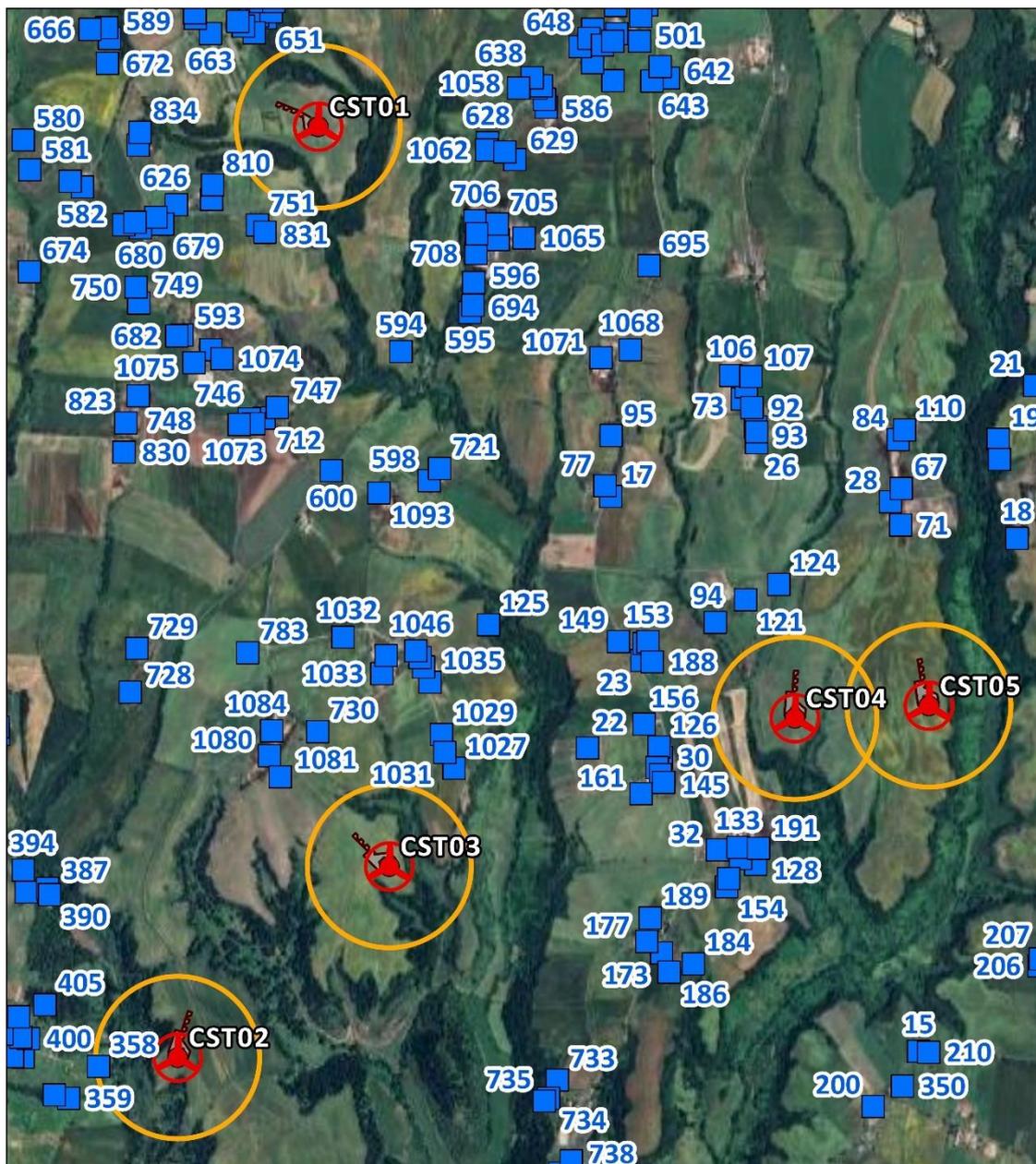


-  Gittata massima 303 m
-  Aerogeneratore di progetto - sorvolo
-  Aerogeneratore di progetto
-  Piazzola definitiva
-  Piazzola temporanea
-  Recettori

0 0,3 0,6 1,2 Kilometers



Figura 3.2: - Layout di progetto con buffer della gittata massima di distacco di una pala – Torri CST06÷CST07 – interferenze con recettori.



- Gittata massima 303 m
- Aerogeneratore di progetto - sorvolo
- Aerogeneratore di progetto
- Piazzola definitiva
- Piazzola temporanea
- Fabbricati

0 0,3 0,6 1,2 Kilometers



Figura 3.3: - Layout di progetto con buffer della gittata massima di distacco di una pala – Torri CST01÷CST05 – interferenze con fabbricati.

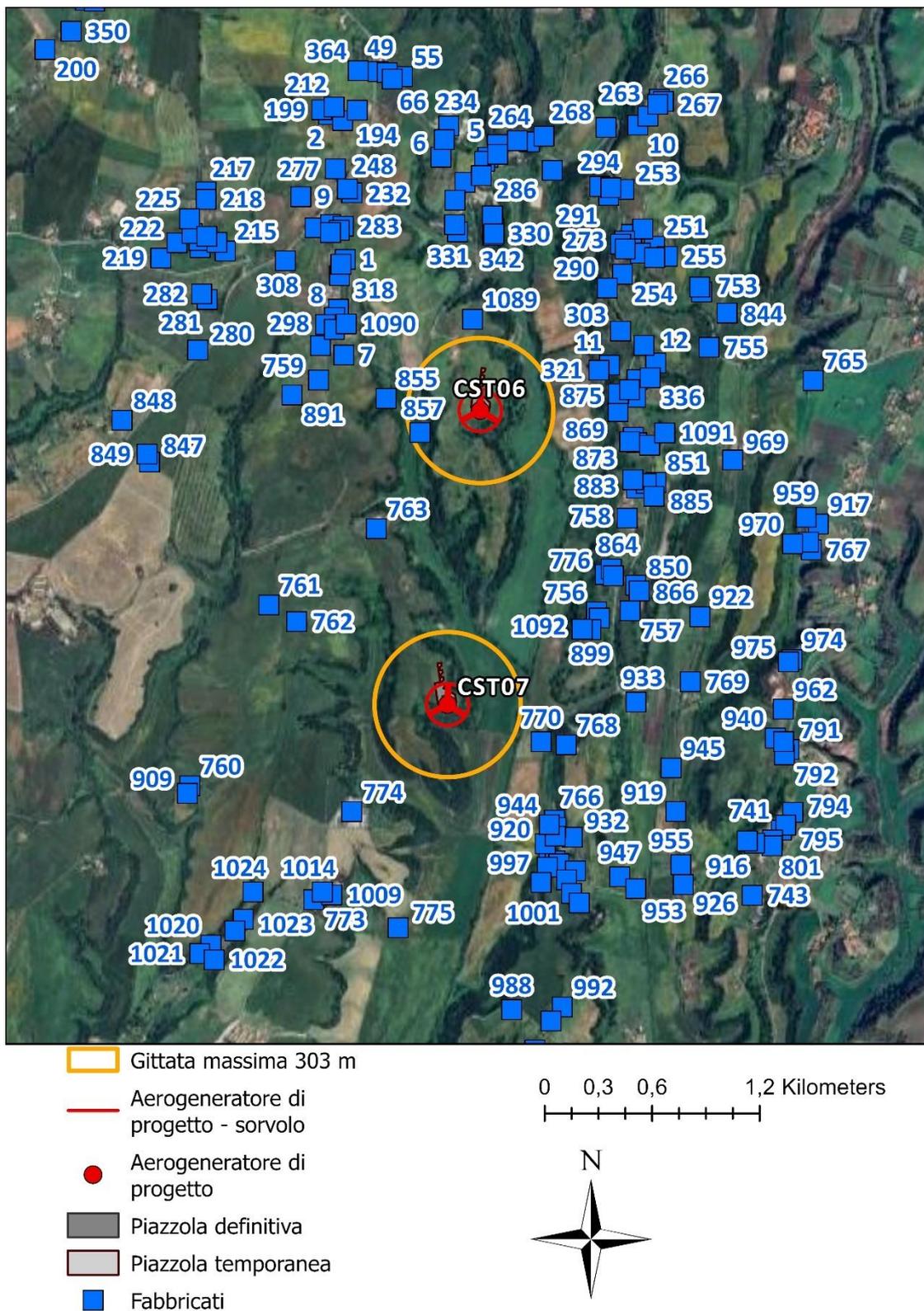


Figura 3.4: - Layout di progetto con buffer della gittata massima di distacco di una pala - Torri CST06÷CST07 - interferenze con fabbricati.



Nella tabella sottostante, si riportano le distanze minime tra i recettori censiti<sup>2</sup>.

*Tabella 3.1: Verifica di interferenza con i recettori*

WTG	COORDINATE UTM – ZONA 32N		ANALISI RECETTORI			
	ID	Longitudine E	Latitudine N	Gittata effettiva (m)	Distanza minima da Recettori (m)	Tipo di recettore (cat. Catastale)
CST01	12,210347	42,011799	303	423	D10	532
CST02	12,204052	41,980573	303	530	C	316
CST03	12,213526	41,986984	303	469	C06	829
CST04	12,231685	41,991958	303	460	C	82
CST05	12,237686	41,992375	303	639	NC	13
CST06	12,257021	41,965368	303	383	NC	883
CST07	12,255384	41,954316	303	413	A	623

Nella tabella sottostante, si riportano le distanze minime tra i fabbricati censiti<sup>2</sup>.

*Tabella 3.2: Verifica di interferenza con i fabbricati*

WTG	COORDINATE UTM – ZONA 32N		ANALISI FABBRICATI			
	ID	Longitudine E	Latitudine N	Gittata effettiva (m)	Distanza minima da Fabbricati (m)	Tipo di fabbricato
CST01	12,210347	42,011799	303	423	D10	658
CST02	12,204052	41,980573	303	297	F	358
CST03	12,213526	41,986984	303	435	NC	1027
CST04	12,231685	41,991958	303	460	C	94
CST05	12,237686	41,992375	303	639	NC	16
CST06	12,257021	41,965368	303	266	NC	857
CST07	12,255384	41,954316	303	413	A	770

<sup>2</sup> Per approfondimenti si rimanda al documento progettuale 2800\_5100\_FRN\_PFTE\_R07\_Rev0\_MONOGRAFIA\_FABBRICATI



## 4. CONCLUSIONI

Il presente studio sulla gittata massima in caso di rottura, evidenzia che:

- i calcoli effettuati dimostrano che per l'aerogeneratore, avente caratteristiche geometriche riportate nei precedenti paragrafi, con altezza mozzo pari a 135 m, alla velocità massima di rotazione a pari a 12 rpm<sup>3</sup>, la distanza massima del punto d'impatto del baricentro di una pala distaccatasi dal rotore è di circa 303 m;
- per tutti gli aerogeneratori CST01-02-03-04-05-06-07 all'interno di un buffer di ampiezza pari alla gittata massima non ricade nessun recettore sensibile; il recettore fabbricato più vicino alla gittata massima di distacco è posizionato a circa 383 metri dall'aerogeneratore CST06;
- per gli aerogeneratori CST02 e CST06 all'interno di un buffer di ampiezza pari alla gittata massima ricade un fabbricato; per l'aerogeneratore CST02 il fabbricato è posizionato a circa 297 metri, mentre per l'aerogeneratore CST06 il fabbricato è posizionato a circa 266 metri.
- per gli aerogeneratori CST01-03-04-05-07 all'interno di un buffer di ampiezza pari alla gittata massima non ricadono fabbricati; il fabbricato più vicino alla gittata massima di distacco è posizionato a circa 413 metri dall'aerogeneratore CST07.

Va, tuttavia, 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;
- la rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore ad asse orizzontale deve essere, in ogni caso, considerato un evento raro, in considerazione alla 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 poliestere o fibre epossidiche. L'utilizzo di questi materiali, infatti, limita, 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;
- il sistema navicella-rotore-torre tubolare è protetto dalla fulminazione in accordo alla norma IEC 61400-24 – livello I. Ciò esclude che si possano generare distacchi delle pale eoliche derivanti direttamente o indirettamente dalle fulminazioni.
- gli aerogeneratori sono dotati di un sistema di rilevamento del ghiaccio. Tale sistema evita il funzionamento della turbina in condizioni di ghiaccio non desiderabili, che potrebbero rappresentare un rischio per l'integrità della turbina o della salute e sicurezza.

Pertanto, alla luce delle considerazioni sopra esposte, si può affermare che le turbine individuate all'interno del presente progetto non costituiscono pericolo per la pubblica incolumità in caso di distacco di pala dal mozzo del rotore.

---

<sup>3</sup> Dato fornito dal costruttore