

APRILE 2024

CALATAFIMI S.R.L.
**IMPIANTO EOLICO “CALATAFIMI WIND” DA 93,6
MW**

LOCALITÀ C. DA BORGO PIETRARENOSA

**COMUNE DI CALATAFIMI-SEGESTA (TP) e
GIBELLINA (TP)**

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

Lorenzo Griso

Francesca Casero

Riccardo Coronati

Codice elaborato

2995_5530_CLT_PFTE_R11_Rev0_GITTATAMASSIMA.docx

Marntana



Memorandum delle revisioni

Cod. Documento	Data	Tipo revisione	Redatto	Verificato	Approvato
2995_5530_CLT_PFTE_R11_Rev0_GITTATAMASSIMA.docx	04/2024	Prima emissione	G.d.L.	E.Lamanna	A.Angeloni

Gruppo di lavoro

Nome e cognome	Ruolo nel gruppo di lavoro	N° ordine
Matteo Lana	Coordinamento Progettazione Civile	
Andrea Amantia	Geologo - Progettazione Civile	
Simone Demonti	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





INDICE

1.	PREMESSA	4
1.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO	4
1.2	DESCRIZIONE GENERALE DI PROGETTO	8
2.	CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI.....	11
2.1	APPROCCIO AL CALCOLO	11
2.2	IPOSTESI DI CALCOLO	13
2.3	FORMULAZIONI	13
2.4	VALIDAZIONE DEL MODELLO TEORICO	15
2.5	CASO STUDIO.....	17
2.6	CONSIDERAZIONI FINALI	19
3.	APPLICAZIONE DEI RISULTATI ALL'IMPIANTO EOLICO IN OGGETTO	20
4.	CONCLUSIONI	22

1. PREMESSA

Il progetto in esame riguarda la realizzazione di un nuovo Parco Eolico della potenza complessiva di **93,6 MW**, che prevede l'installazione di **n. 13 aerogeneratori da 7,2 MW** da installarsi nel territorio comunale di Calatafimi-Segesta e Gibellina in provincia di Trapani. Le opere di connessione interesseranno, i comuni già citati, di Calatafimi-Segesta e Gibellina, sempre in provincia di Trapani (TP).

La Società Proponente è la Montana Progetti S.R.L., con sede legale in Via Angelo Carlo Fumagalli 6, 20143 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 220 kV con una nuova stazione elettrica di trasformazione (SE) 220/150/36 kV (sezione a 220 kV da realizzare già in classe di isolamento 380 kV) della RTN, da inserire in entra - esce su entrambe le terne della linea 220 kV RTN "Partanna – Partinico". Ai sensi 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 in antenna a 220 kV per il collegamento della centrale alla citata SE costituisce impianto di utenza per la connessione, mentre lo stallo arrivo produttore a 220 kV nella suddetta stazione costituisce impianto di rete per la connessione.

Nel suo complesso il parco di progetto sarà composto:

- da N° 13 aerogeneratori della potenza nominale di 7,2 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 collegamento alla rete elettrica;
- dalle opere di regimentazione delle acque meteoriche;
- dalle reti tecnologiche per il controllo del parco.

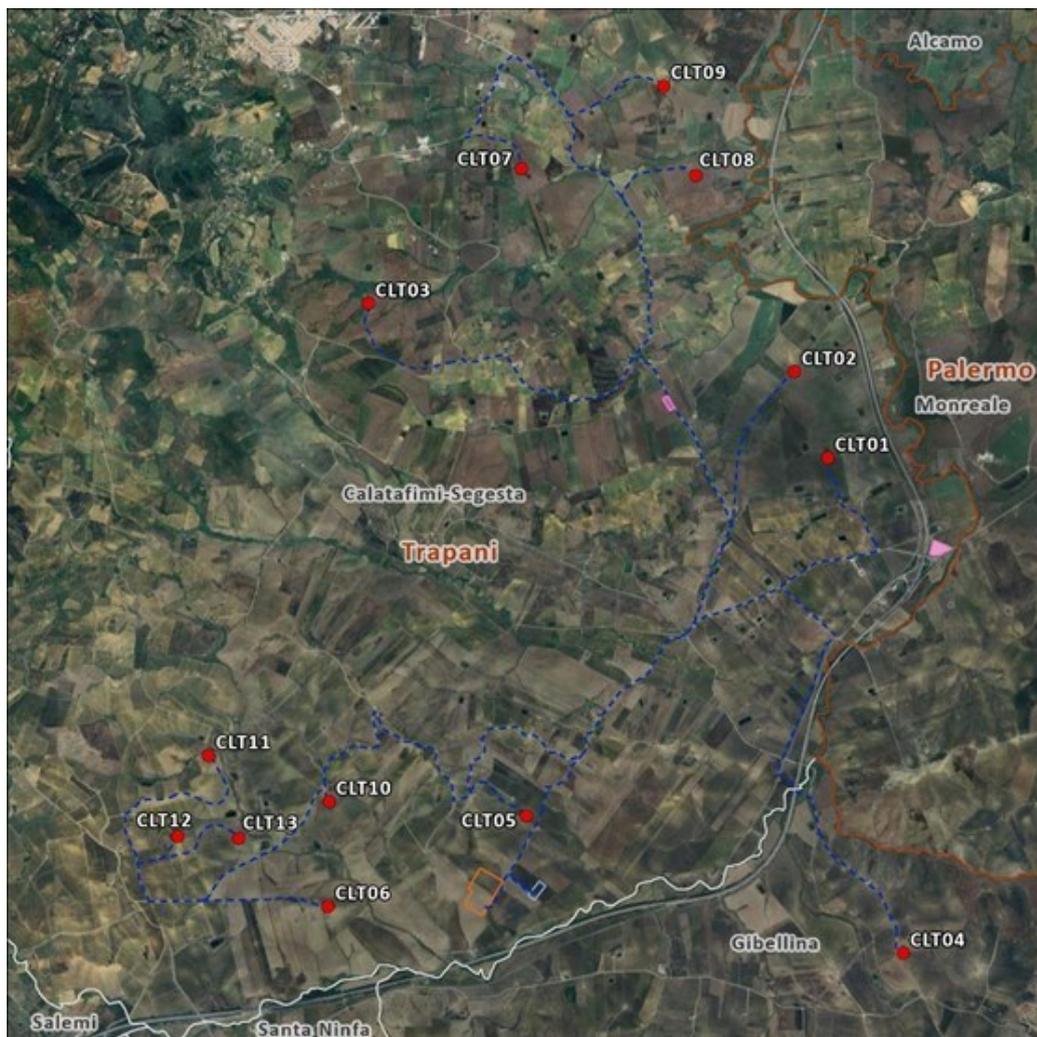
A tal fine il presente documento costituisce la **Relazione di Calcolo della Gittata** del progetto.

1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO

Il parco eolico in progetto si estende nella provincia di Trapani e prevede l'installazione di n. 13 aerogeneratori territorialmente così collocati:

- n. 12 aerogeneratori nel comune di Calatafimi-Segesta (CLT01, CLT02, CLT03, CLT05, CLT06, CLT07, CLT08, CLT09, CLT10, CLT11, CLT12, CLT13);
- n. 1 aerogeneratore nel comune di Gibellina (CLT04).

Le opere di connessione interesseranno, i comuni già citati, di Calatafimi-Segesta e Gibellina, sempre in provincia di Trapani (Figura 1.1).



LEGENDA

Opere di progetto

- Aerogeneratore di progetto
- Area di deposito temporaneo
- Cavidotto interrato di connessione
- Cabina di smistamento
- Sottostazione Elettrica Utente (SSEU)
- Nuova Stazione Elettrica (SE) Terna

Limiti amministrativi

- Province
- Comuni

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

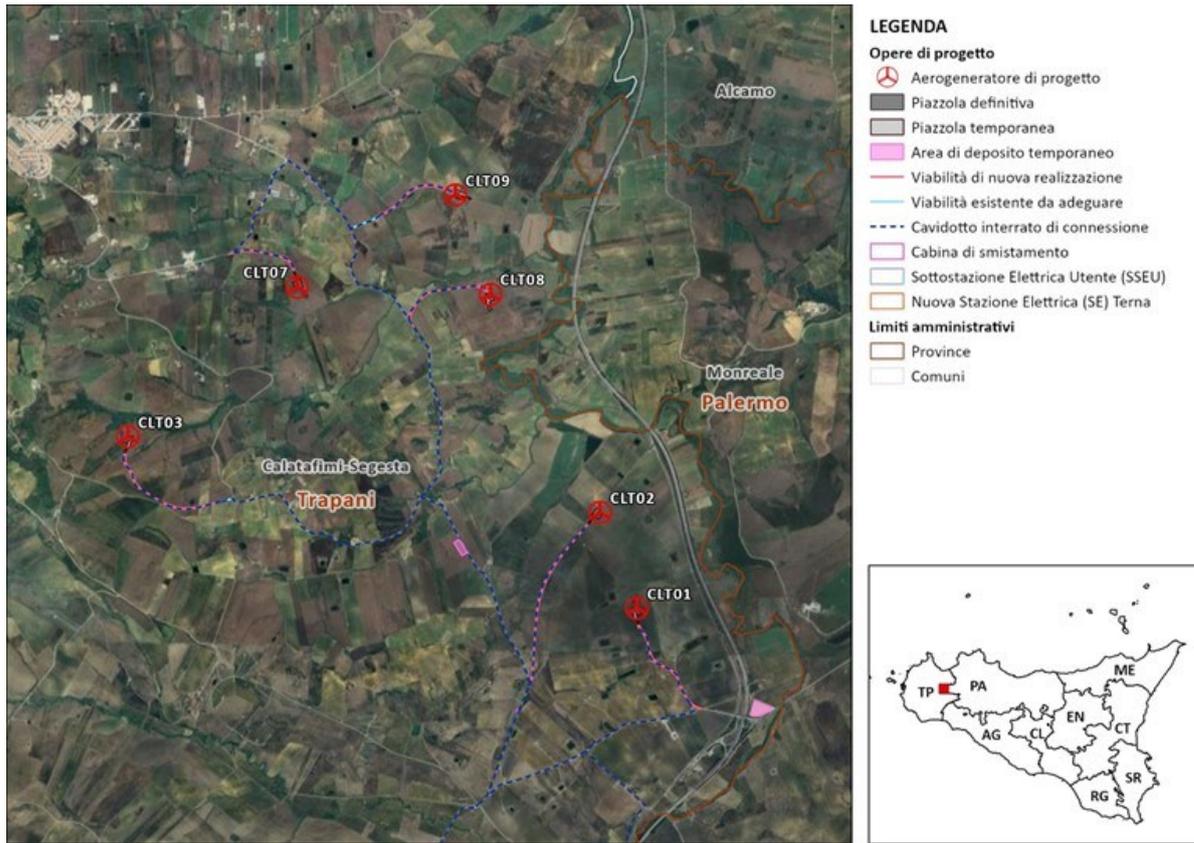


Figura 1.2: Inquadramento della viabilità di progetto nella parte nord del layout

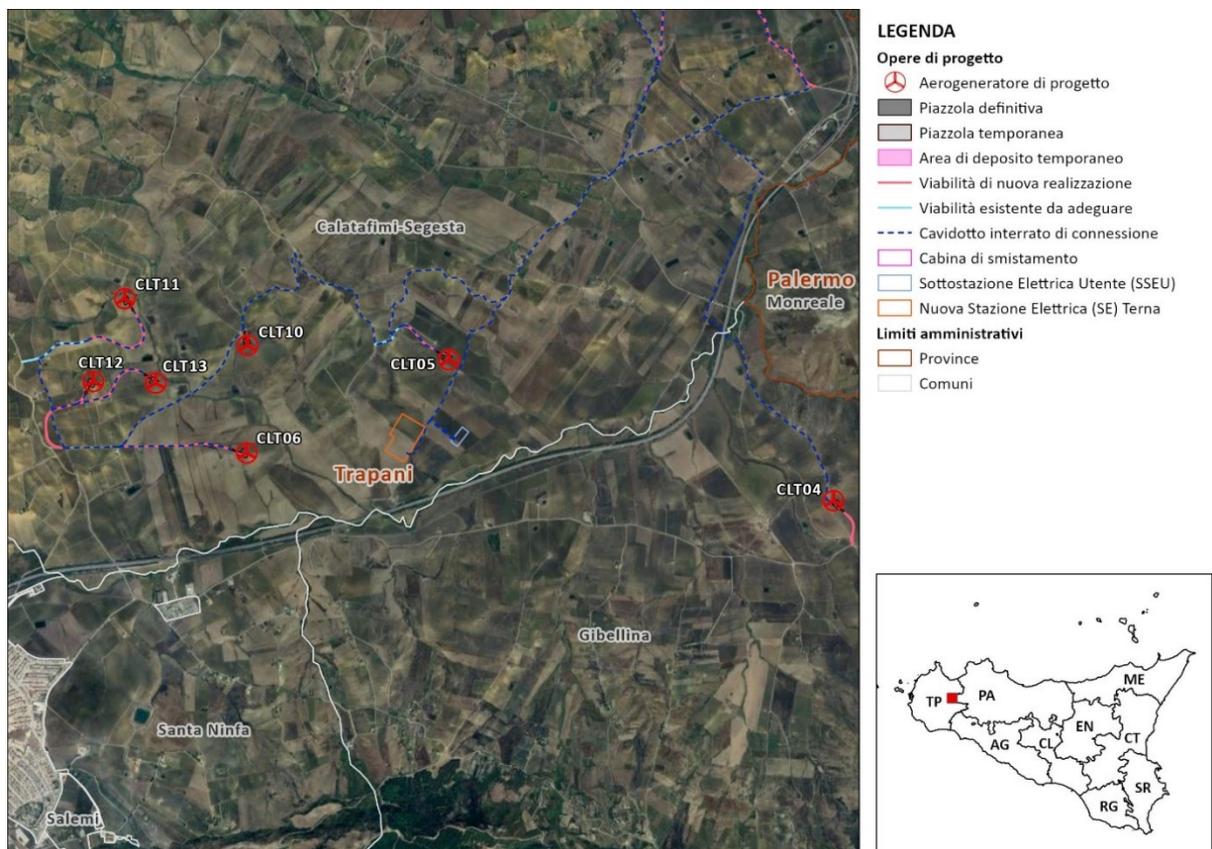


Figura 1.3: Inquadramento della viabilità di progetto nella parte sud del layout

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
CLT01	12,943475	37,868947
CLT 02	12,939947	37,875803
CLT 03	12,897152	37,880504
CLT 04	12,952097	37,829414
CLT 05	12,914111	37,839776
CLT 06	12,894508	37,832136
CLT 07	12,91215	37,891557
CLT 08	12,929619	37,891342
CLT 09	12,926231	37,898461
CLT 10	12,894354	37,84055
CLT 11	12,882218	37,844005
CLT 12	12,879316	37,837466
CLT 13	12,885443	37,83745

In via preliminare si può ipotizzare che l'accesso al sito avvenga partendo dal vicino porto di Mazzara del Vallo, proseguendo in direzione Est e poi Nord lungo l'Autostrada Palermo-Mazara del Vallo (A29/E90) fino all'uscita di Gallitello. Nei pressi dell'uscita, in uno spiazzo dove è già stata ubicata un'opera simile per altri parchi eolici, potrà essere realizzata un'area di trasbordo dove i diversi componenti verranno scaricati dai rimorchi standard per essere successivamente ricaricati su mezzi speciali che permettono di ridurre ingombri e raggi di curvatura rendendo possibile il passaggio su strade minori (es. blade-lifter, rimorchi modulari, etc.). Dall'area di trasbordo percorrendo diverse strade statali, provinciali e comunali si potranno raggiungere le diverse piste di cantiere di nuova realizzazione per la costruzione ed il futuro accesso ai diversi aerogeneratori.

In totale la viabilità di accesso al parco presenta uno sviluppo di circa 55 km.

Nella seguente immagine si raffigura il possibile percorso.

L'area di trasbordo può essere considerato l'ingresso alla viabilità interna al parco. Dal suddetto incrocio inizia il sistema di strade che unisce le diverse piazzole sfruttando in parte la viabilità esistente e in parte la viabilità di nuova realizzazione.

Questa ipotesi dovrà essere analizzata in fase di progettazione esecutiva da una società specializzata in trasporti speciali. (

Figura 1.4).



Figura 1.4: ipotesi di viabilità di accesso al sito (linea magenta)

1.2 DESCRIZIONE GENERALE DI PROGETTO

Oggetto della presente relazione è l'analisi della gittata degli elementi rotanti di un aerogeneratore nello specifico Vestas "EnVentus™V172-7.2 MW 50/60 Hz".

Le principali specifiche tecniche dell'aerogeneratore vengono riportate nella seguente tabella:

Tabella 1.2: Caratteristiche tecniche aerogeneratore

AEROGENERATORE VESTAS	
DATI DI FUNZIONAMENTO	
Potenza nominale	7.200 kW
Velocità minima del vento	3.0 m/s
Velocità massima del vento	25.0 m/s
Classe di vento-IEC	S
ROTORE	
Diametro del rotore	172 m
Area spazzata	23.235 mq
Velocità massima	12,1 giri/min
TORRE	
Tipo	Torre in acciaio tubolare
Altezza mozzo	114 m
Altezza al Top	200 m
PALA	
Lunghezza	84,35 m
Numero pale	3
Materiale	Fibreglass reinforced; polyester, carbon fibres and metallic diverter strips
DATI ELETTRICI	
Frequenza	50Hz/60Hz
Voltaggio	800 V
Tipo generatore	three-phase permanent magnet generator

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.

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 1.5)



Figura 1.5: Rappresentazione di un aerogeneratore.

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 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 caso specifico, verrà presa in considerazione la peggiore condizione, ovvero il distacco completo della pala alla radice. Questa tipologia di incidente, seppur improbabile, 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).

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 una probabile "sezione" di rottura, pertanto, 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.

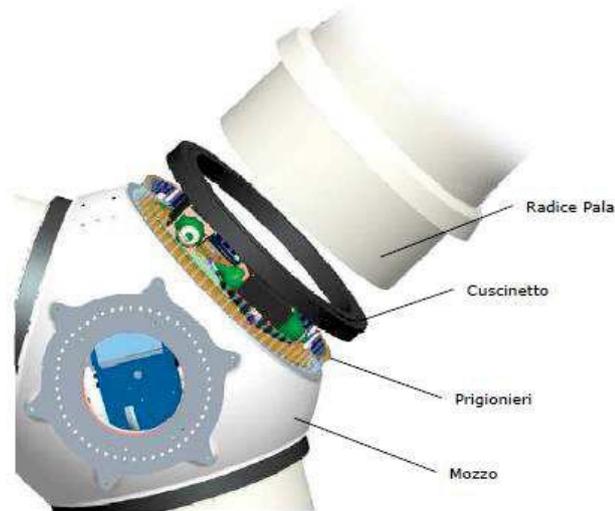


Figura 2.1: particolare mozzo aerogeneratore.

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.

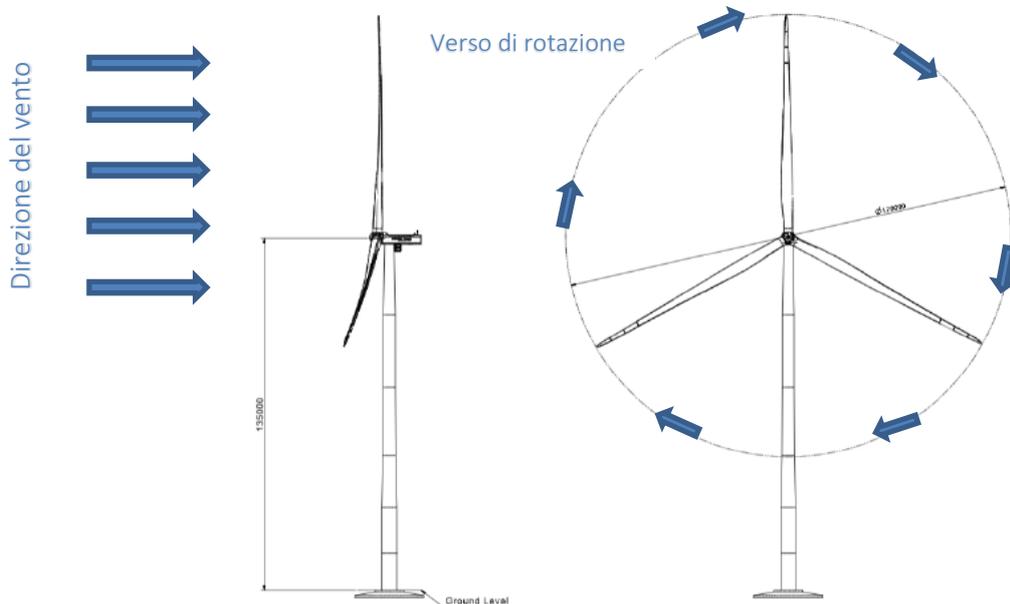


Figura 2.2: Schematizzazione Verso di Rotazione / Direzione del vento.

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.



2.2 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.

2.3 FORMULAZIONI

Il seguente metodo di calcolo della gittata è riferito all'aerogeneratore di tipo Vestas EnVentus™V172-7.2 MW, i dati di input del calcolo sono stati forniti dal costruttore.

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

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

$$Y_g = rg \sin \alpha$$

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
 $v_{x0} = v_0 \cos (90 - \alpha) = v_0 \sin \alpha$
 $v_{y0} = v_0 \sin (90 - \alpha) = v_0 \cos \alpha$
 $v_0 = \omega r g = (2\pi n r g)/60$
 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 (Geff) dalla formula:

$$\mathbf{G_{eff} = G + Lg}$$

dove: $Lg = 2/3 L$

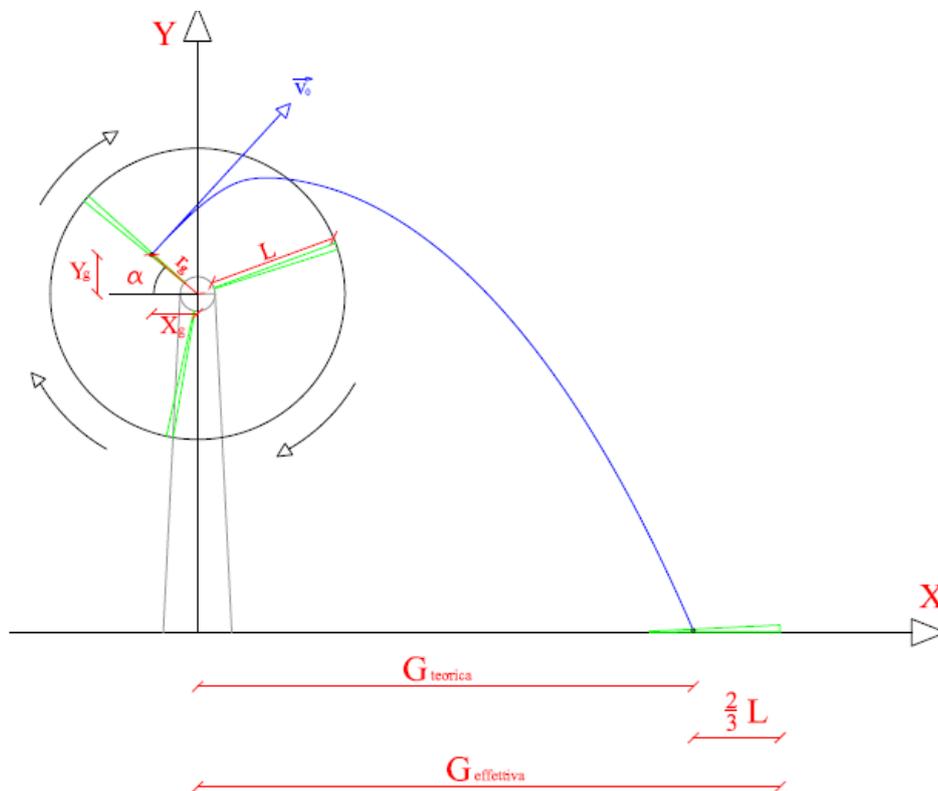


Figura 2.3: Schema della Gittata per angolo compreso tra 0° e 90°.

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

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

Dove rispetto quanto sopra: v_{x0} è negativo perché verso sinistra, quindi G sarà negativo (Figura 2.4)

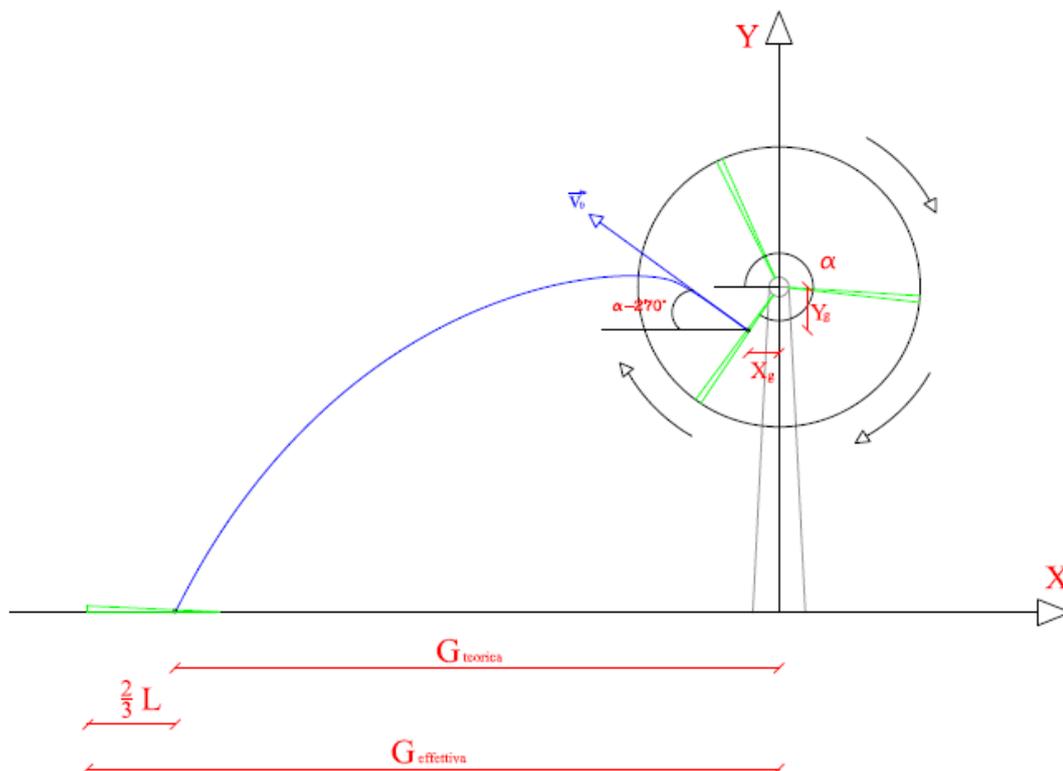


Figura 2.4: Schema della Gittata per angolo compreso tra 270° e 360° .

2.4 VALIDAZIONE 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 imbarcata 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 prende in esame due studi (di seguito indicati come caso a e caso b):

- 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, tra i più completi ad oggi disponibili;
- 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 se dalla VESTAS. Questo studio più recente affina i modelli teorici utilizzati da Vesta 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) ha preso in considerazione due aerogeneratori, in questa sede genericamente denominati TIPO XX ed aventi caratteristiche diverse:

- aerogeneratore TIPO 1 ha 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 ha 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 include solo le forze di inerzia ed esclude le forze viscosse;
- la seconda include le forze viscosse;
- la terza 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 pari a 20 giri/min;
- per l'aerogeneratore di TIPO 2 pari a 16,39 giri/min.

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

- la prima, più conservativa, include solo le forze d'inerzia ed esclude le forze viscosse → gittata maggiore;
- la seconda include le forze viscosse → gittata circa 20% in meno rispetto a sopra;
- la terza considera il moto della pala completo → gittata più bassa.

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 nello studio a) sono stati i seguenti:

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

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

Altresì, i risultati ottenuti a suo tempo nello studio b) sono stati i seguenti:

- aerogeneratore di TIPO 3, caso semplificato che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosse 145 m;
- aerogeneratore di TIPO 4, caso semplificato che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosse 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 2.1: Confronto delle gittate teoriche

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 viscosive	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 viscosive	108 m	156 m
VESTAS CASO 3	Caso conservativo che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosive	145 m	237 m
VESTAS CASO 4	Caso conservativo che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosive	150 m	257 m

2.5 CASO STUDIO

In Tabella 2.1 si riportano i principali parametri geometrici riportati dal costruttore e utilizzati per il calcolo della gittata.

Tabella 2.2: Parametri del calcolo della gittata e risultati.

ENVENTUS™V172-7.2 MW 50/60 HZ	
ELEMENTO	DIMENSIONE
Lunghezza pala	84,35 [m]
Velocità rotazione massima	12 [rpm]
Altezza mozzo	114,0 [m]
Posizione baricentro rispetto al mozzo a velocità rotazionale 0	29.8 [m]
Diametro del rotore	172 [m]



In Tabella 2.3 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 2.3). Dove 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 2.3: Risultati del calcolo della gittata

PARAMETRO CALCOLATO	[1] ANGOLI COMPRESI TRA 0° E 90°	[2] ANGOLI COMPRESI TRA 270° E 360°
Angolo α	65°	308°
V_0	37.41 m/s	37.41m/s
V_{x0}	33.90 m/s	-29,48 m/s
V_{y0}	15.81 m/s	23,03m/s
Gittata teorica	231,83 m	231,84 m
L_g	56,23 m	56,23 m
Gittata Effettiva	288,07 m	288,07 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 $\alpha = 90^\circ$, quando gli sforzi di flessione sono massimi, e $\alpha = 180^\circ$, quando 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: $\alpha = 90^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$, rispettivamente a flessione e trazione, darebbero luogo a valori della gittata massima decisamente più bassa di quella calcolata in Tabella 3.2, come è possibile osservare dalla Figura 2.5.

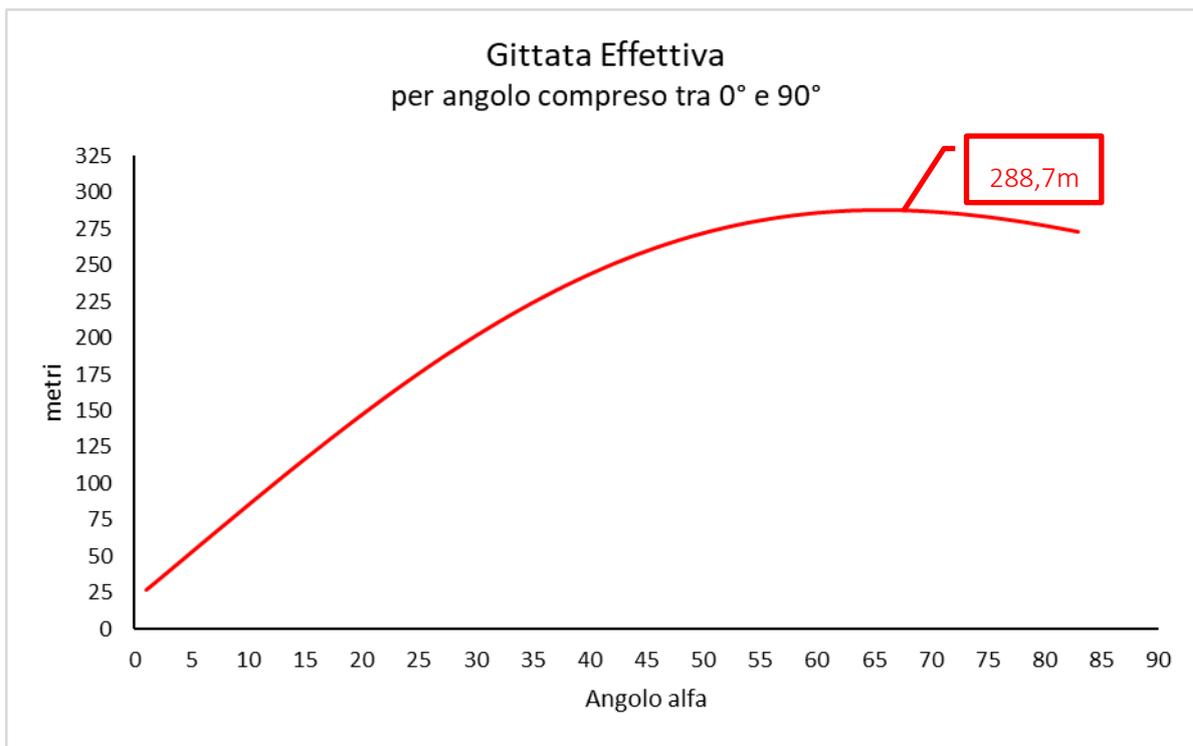


Figura 2.5: Calcolo Gittata Effettiva vs. angolo di distacco [°], si rimanda al paragrafo 3 per la definizione delle traiettorie.

2.6 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 231,8 m per un angolo di distacco pari a 65° circa, al quale dovrà aggiungersi la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno della pala, 56,3 m, per un valore complessivo precauzionalmente arrotondato in:

$$G_{\text{eff}} = 290\text{m}$$

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 (schema in figura 2.3)

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 (Figg. 3.1 – 3.3)

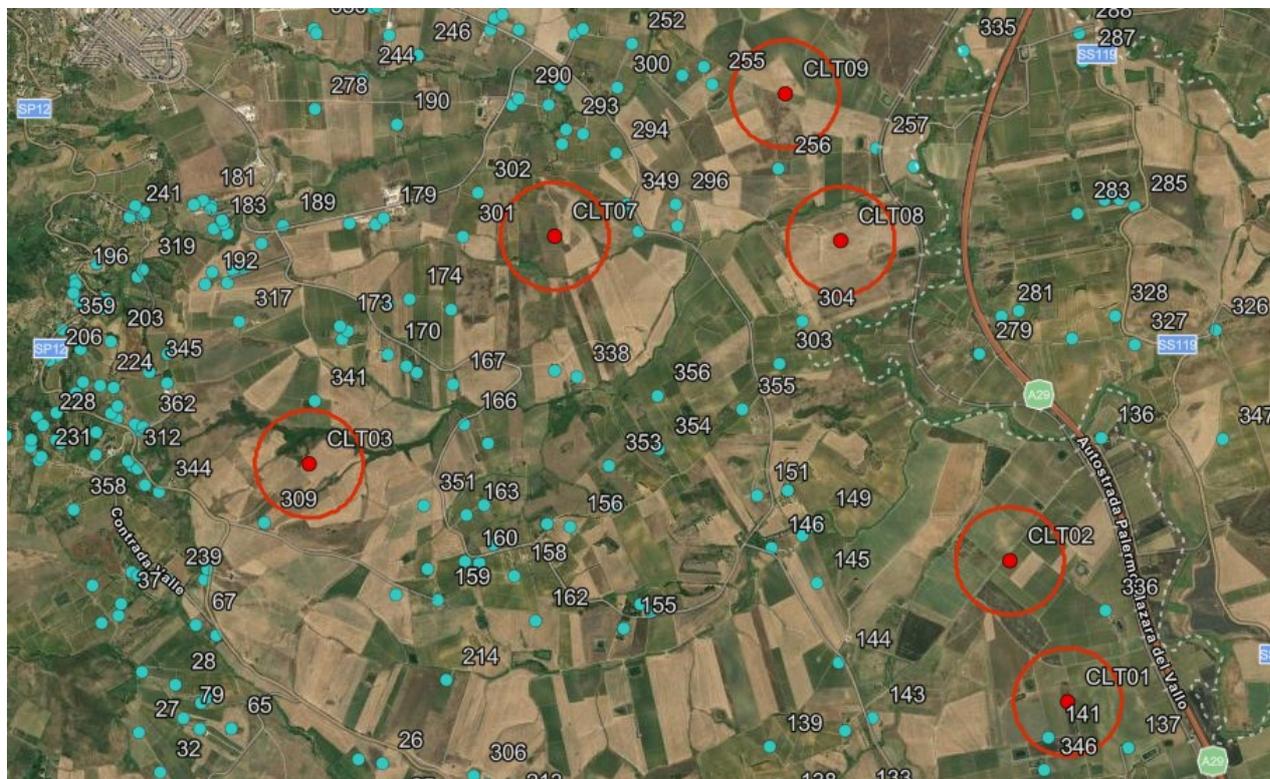


Figura 3.1: Buffer della gittata massima di distacco di una pala settore A

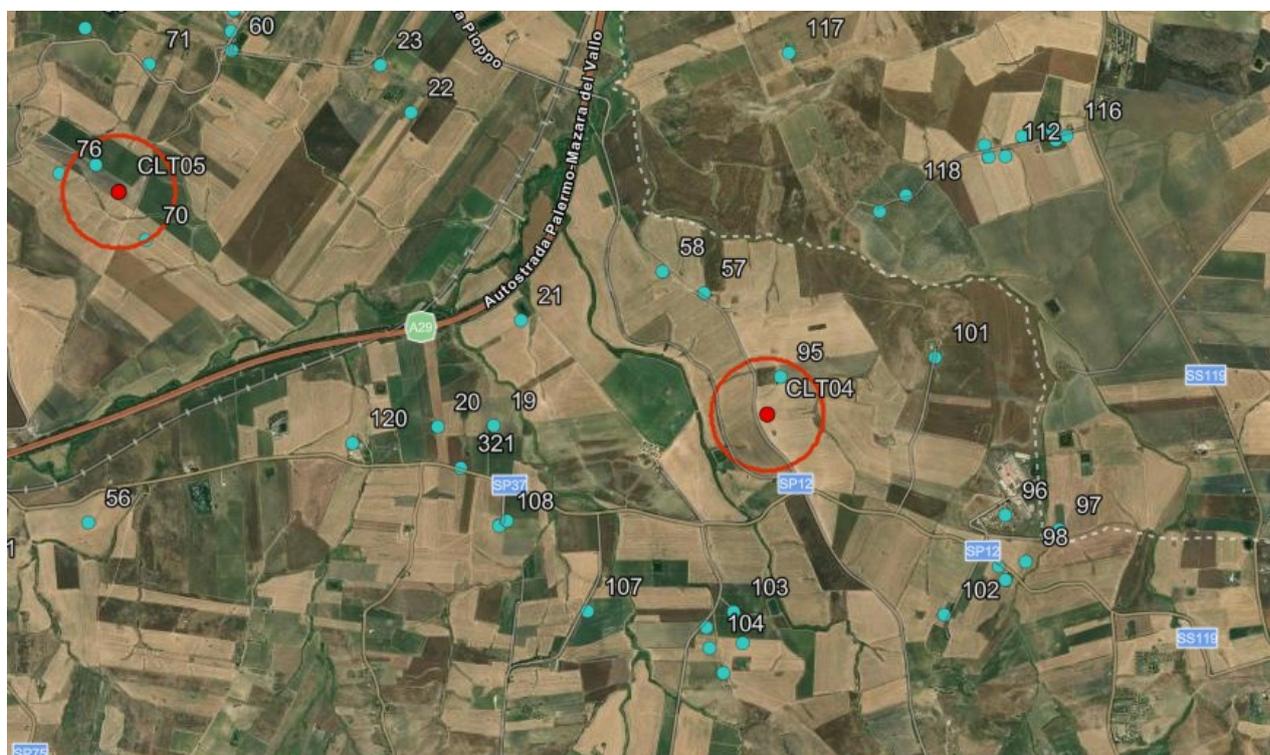


Figura 3.2: Buffer della gittata massima di distacco di una pala settore B

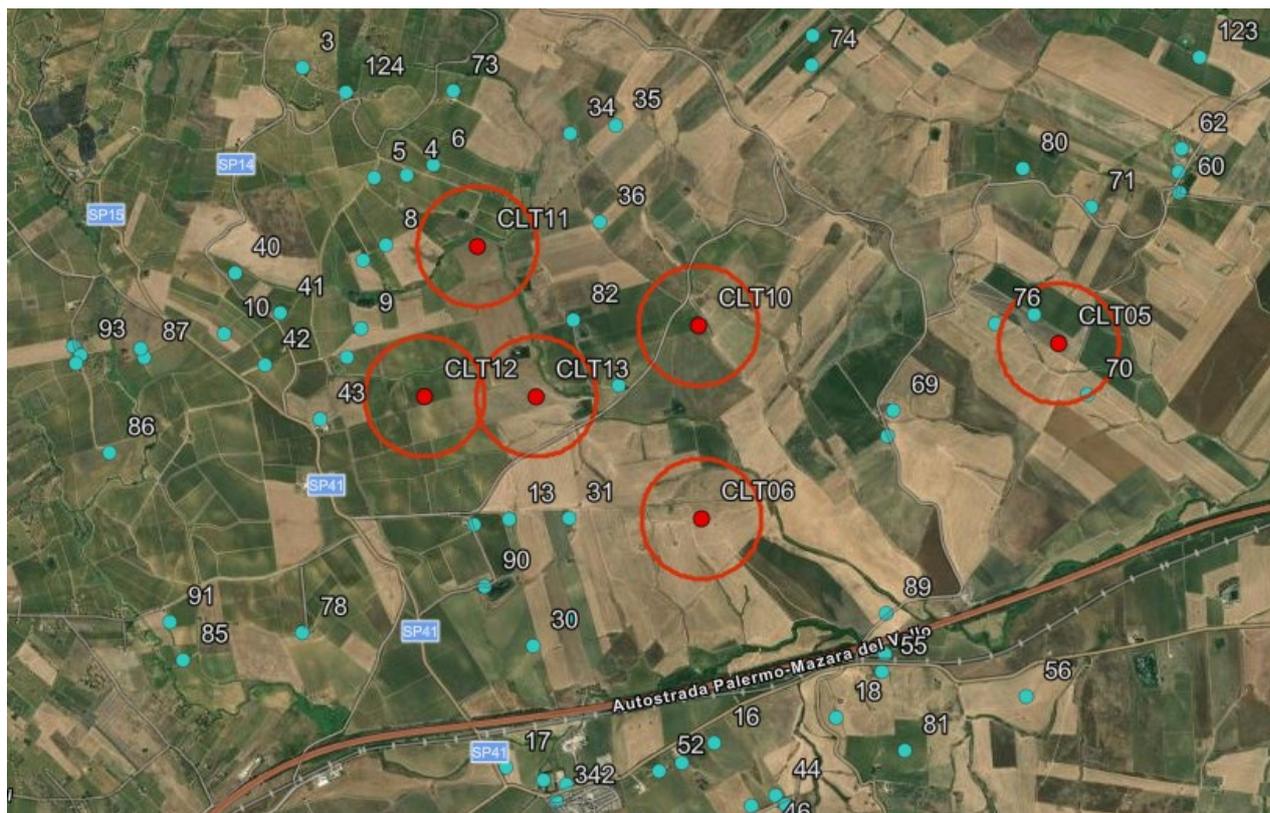


Figura 3.3: Buffer della gittata massima di distacco di una pala settore C

Sulla base delle elaborazioni rappresentate nelle soprastanti mappe, si riportano nella successiva tabella le distanze minime tra i recettori più prossimi agli aerogeneratori, con priorità per quelli regolarmente censiti al catasto nazionale.

Tabella 3.1: Verifica di interferenza dei recettori con la gittata effettiva

Identificativo aerogeneratore	Gittata effettiva (m)	Distanza minima recettore (m)*	Categoria catastale	ID fabbricato
CLT1	290	219	NC	141
CLT2	290	>500	F02	336
CLT3	290	400	C02	309
CLT4	290	197	C02	95
CLT5	290	285	C02	70
CLT6	290	>500	C02	31
CLT7	290	420	NC	349
CLT8	290	477	NC	304
CLT9	290	388	C02	255
CLT10	290	480	C02	77
CLT11	290	440	A04	6
CLT12	290	450	A04	9
CLT13	290	410	A04	82

*Si rimanda per i dettagli alla relazione: 2995_5530_CLT_PFTE_R07_Rev0_MONOGRAFIAFABBRICATI.

4. CONCLUSIONI

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

- i calcoli effettuati dimostrano che per l'aerogeneratore Modello Vestas EnVentus™V172-7.2 MW 50/60 Hz con altezza mozzo pari a 114 m, alla velocità massima di rotazione a pari a 12 rpm¹, la distanza massima del punto d'impatto del baricentro di una pala distaccatasi dal rotore è circa 290 m;
- Per le 13 WTG analizzate, all'interno di un buffer di ampiezza pari alla gittata massima (290m) non ricade nessun recettore sensibile. Il recettore fabbricato più vicino alla gittata massima di distacco è posizionato a circa 219 metri dall'aerogeneratore CLT1, trattasi di un magazzino attrezzi non censito al catasto nazionale.

Va inoltre 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, categorizzata come 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;
- 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 prodotti direttamente o indirettamente dalle fulminazioni.

Alla luce delle considerazioni sopra esposte, si può affermare che la realizzazione delle turbine nelle aree individuate all'interno del presente progetto non costituisce pericolo per la pubblica incolumità in caso di distacco di pala dal mozzo del rotore.

¹ Dato fornito dal costruttore