

Febbraio 2024

SKI 12 S.R.L.

WIND FARM TRONCO

IMPIANTO EOLICO DA 52,8 MW

LOCALITÀ TRONCO

**COMUNE DI SERRACAPRIOLA (FG) e
TORREMAGGIORE (FG)**

ELABORATI TECNICI DI PROGETTO

ELABORATO R11

ANALISI DELLA GITTATA MASSIMA

Progettista

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

Coordinamento

Eleonora Lamanna

Matteo Lana

Lorenzo Griso

Francesca Casero

Codice elaborato

2800_5528_TRN_PFTE_R11_Rev0_GITTATAMASSIMA.docx

Mantovana



Memorandum delle revisioni

Cod. Documento	Data	Tipo revisione	Redatto	Verificato	Approvato
2800_5528_TRN_PFTE_R11_Rev0_GIT TATAMASSIMA.docx	02/2024	Prima emissione	G.d.L.	E. Lamanna	A. Angeloni

Gruppo di lavoro

Matteo Lana	Coordinamento Progettazione Civile	
Andrea Amantia	Geologo - Progettazione Civile	
Paolo Pallavicini	Ingegnere Ambientale – Progettazione Idraulica	
Simone Demonti	Dati Territoriali – Esperto GIS	



INDICE

1. PREMESSA	4
1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO	4
2. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI.....	7
2.1 DESCRIZIONE GENERALE DI PROGETTO	7
2.2 APPROCCIO AL CALCOLO	8
2.3 IPOTESI DI CALCOLO	9
2.4 VALIDAZIONE DEL MODELLO TEORICO	10
2.5 FORMULAZIONI	12
2.6 CASO STUDIO.....	14
2.7 CONSIDERAZIONI FINALI.....	16
3. APPLICAZIONE DEI RISULTATI ALL'IMPIANTO EOLICO IN OGGETTO	17
4. CONCLUSIONI	19



1. PREMESSA

Il progetto in esame riguarda la realizzazione di un nuovo Parco Eolico della potenza complessiva di **52,8 MW**, che prevede l'installazione di **n. 8 aerogeneratori da 6,6 MW** da installarsi nel territorio comunale di Serracapriola e Torremaggiore in provincia di Foggia. Le relative opere di connessione, oltre ai comuni già citati interesseranno anche il territorio del comune di Rotello (CB).

La Società Proponente è la SKI 12 S.R.L., con sede legale in Via Cardoso 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 elaborata prevede che la centrale venga collegata in antenna a 36 kV su un futuro ampliamento della Stazione Elettrica (SE) della RTN 380/150 kV di Rotello. 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 in antenna a 36 kV per il collegamento della centrale sulla Stazione Elettrica della RTN costituisce impianto di utenza per la connessione, mentre lo stallo arrivo produttore a 36 kV nella suddetta stazione costituisce impianto di rete per la connessione.

Nel suo complesso il parco di progetto sarà composto:

- da N° 8 aerogeneratori della potenza nominale di 6,6 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 massima** del progetto.

1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO

Il parco eolico in progetto si estende prevalentemente nella provincia di Foggia e prevede l'installazione di n. 8 aerogeneratori territorialmente così collocati:

- n. 2 aerogeneratori nel comune di Torremaggiore;
- n. 6 aerogeneratori nel comune di Serracapriola.

Le opere di connessione interesseranno, oltre ai comuni già citati, anche i territori comunali di Rotello, nella provincia di Campobasso, nella regione Molise (Figura 1.1).

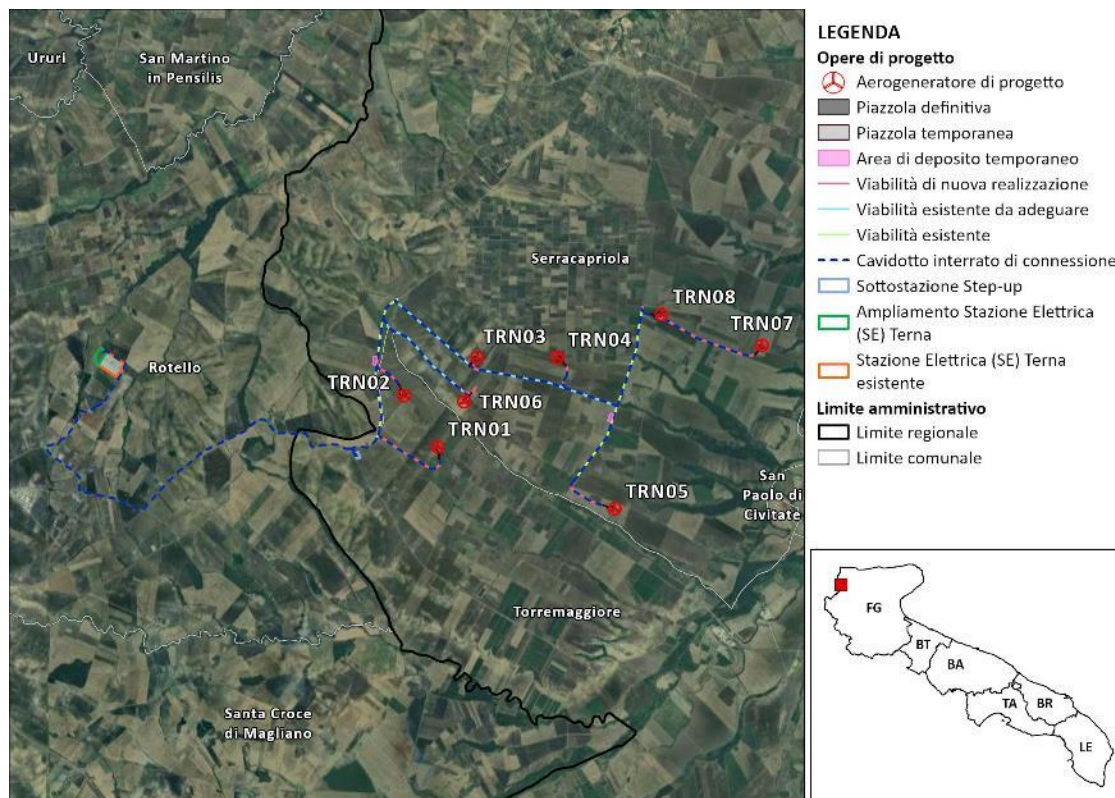


Figura 1.1: Localizzazione a scala regionale, provinciale e comunale dell'impianto proposto

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

Tabella 1-1: Coordinate aerogeneratori

WTG	WGS 84 – GRADI DECIMALI	
	Longitudine E	Latitudine N
TRN01	15,1272493	41,7467489
TRN02	15,1214560	41,7533523
TRN03	15,1341832	41,7583329
TRN04	15,1480929	41,7583206
TRN05	15,1579445	41,7385370
TRN06	15,1318711	41,7525791
TRN07	15,1832346	41,7592473
TRN08	15,1662730	41,7638712

L'accesso al sito avverrà mediante strade esistenti a carattere nazionale e regionale partendo dal porto di Manfredonia (FG) 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 1.2).

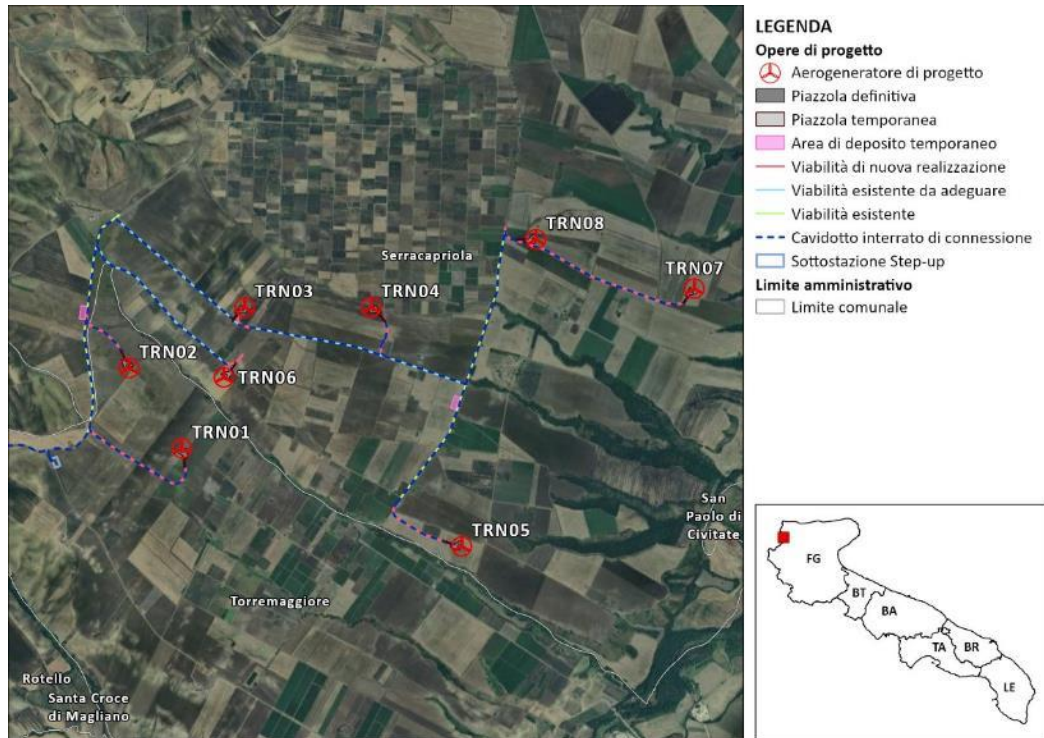


Figura 1.2: Inquadramento della viabilità di progetto

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: ≤ 135 m;
- diametro rotore: ≤ 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 riportati¹.

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	
DATI DI FUNZIONAMENTO	
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
ROTORE	
Diametro del rotore	172 m
Area spazzata	23235 mq
Velocità massima	12 giri/min
TORRE	
Tipo	Torre in acciaio tubolare
Altezza mozzo	134 m
Altezza al Top	220 m
PALA	
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.

¹ SIEMENS GAMESA SG 6.6-170; VESTAS V 172; 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.

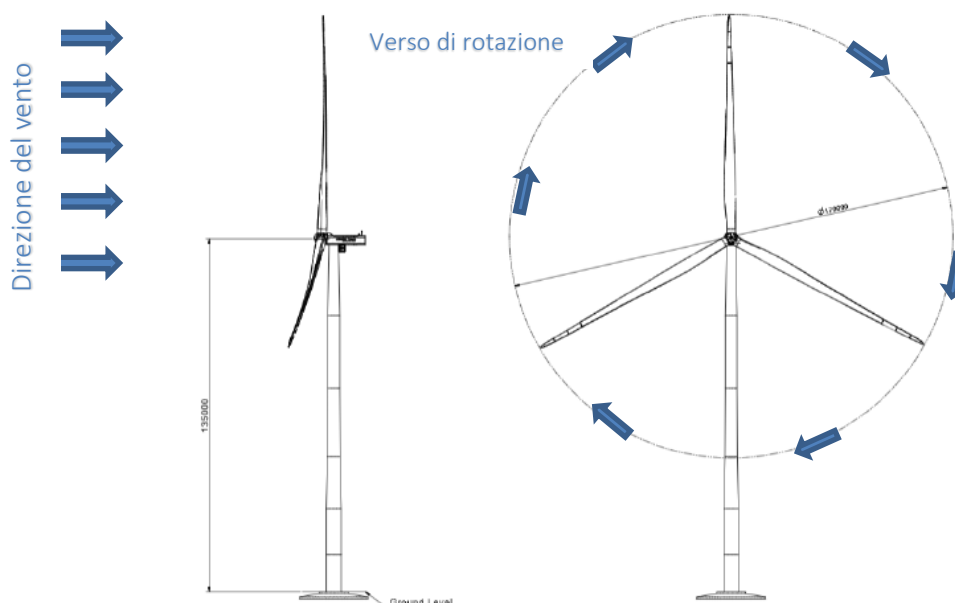


Figura 2.2: Schematizzazione Verso di Rotazione / Direzione del vento.

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 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):

- 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, 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 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:

- o 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;
- o 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 2.2).

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

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

$$Y_g = r_g \sin \alpha$$

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

$X_g = r_g \cos \alpha$ - 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 (G_{eff}) dalla formula:

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

dove: $Lg = 2/3 L$

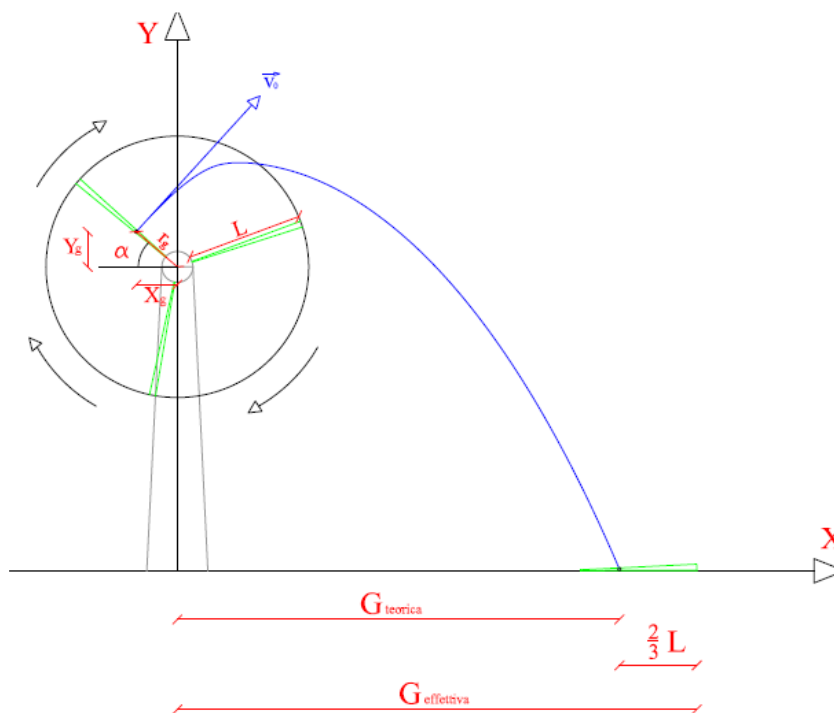


Figura 2.3: Schema della Gittata per angolo compreso tra 0° e 90° .

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

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

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

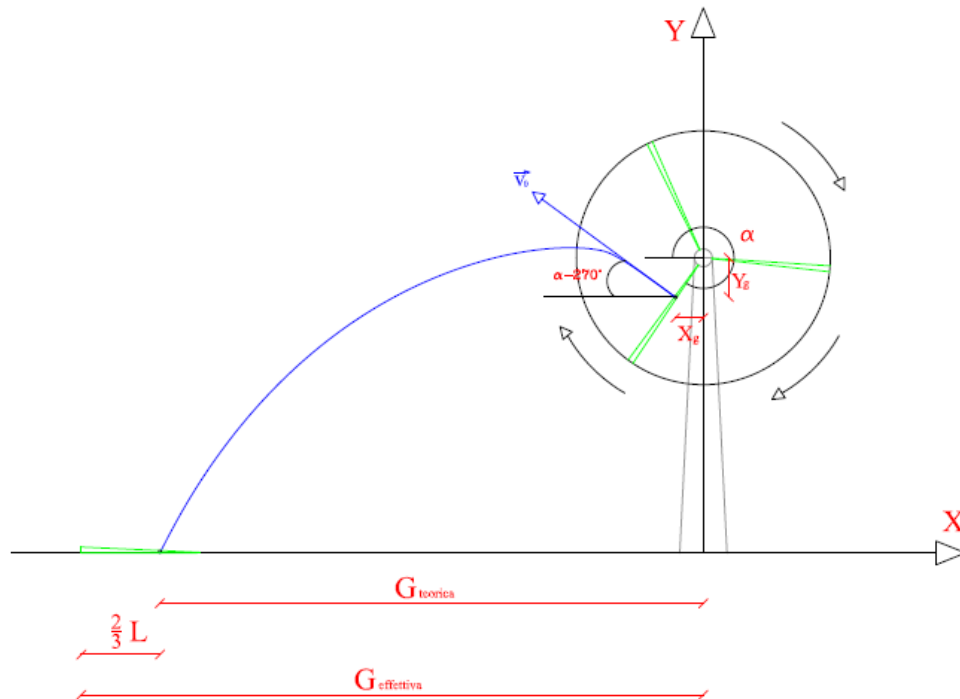


Figura 2.4: Schema della Gittata per angolo compreso tra 270° e 360°.

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). 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 2.4: Risultati del calcolo della gittata

PARAMETRO CALCOLATO	[1] ANGOLI COMPRESI TRA 0° E 90°	[2] ANGOLI COMPRESI TRA 270° E 360°
Angolo α	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 $\alpha = 90^\circ$, 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 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 (Figura 3.1).

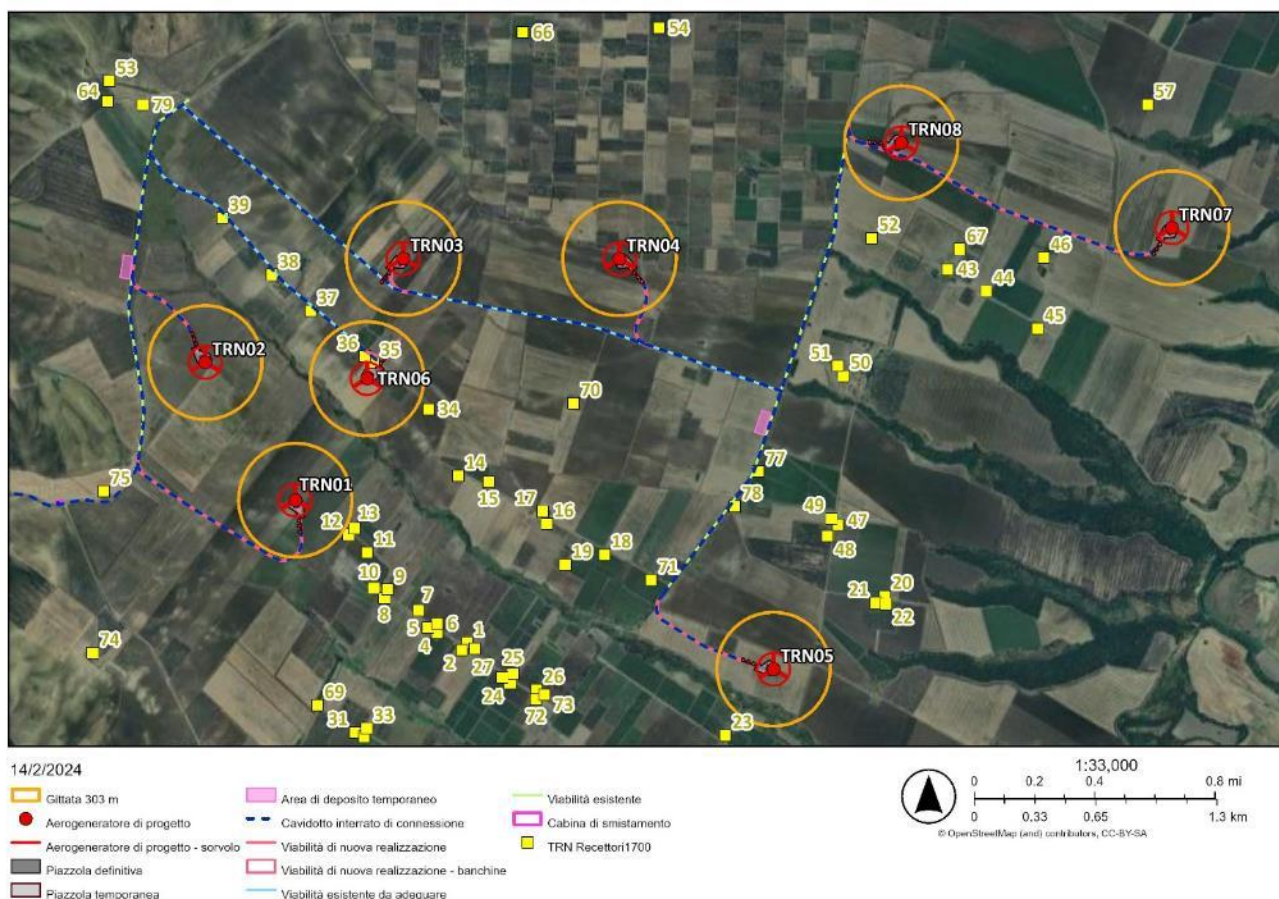


Figura 3.1: - Layout di progetto con buffer della gittata massima di distacco di una pala.

Nella tabella sottostante, si riportano le distanze minime tra i recettori censiti².

² Per approfondimenti si rimanda al documento progettuale 2800_5528_TRN_PFTE_R07_Rev0_MONOGRAFIAFABBRICATI



Tabella 3.1: Verifica di interferenza con i recettori

WTG	COORDINATE UTM – ZONA 32N		ANALISI RECETTORI		
	ID	Nord	Est	Gittata effettiva (m)	Distanza minima da Fabbricati (m)
TRN01	15,1272493	41,7467489	303	372	NC (ABITAZIONE)
TRN02	15,1214560	41,7533523	303	>500	F02 (RUDERE)
TRN03	15,1341832	41,7583329	303	>500	F02 (RUDERE)
TRN04	15,1480929	41,7583206	303	>500	F06 (MAGAZZINO)
TRN05	15,1579445	41,7385370	303	428	A03 (ABITAZIONE)
TRN06	15,1318711	41,7525791	303	87	F02 (RUDERE)
TRN07	15,1832346	41,7592473	303	>500	A04 (ABITAZIONE)
TRN08	15,1662730	41,7638712	303	>500	A04 (ABITAZIONE)



4. CONCLUSIONI

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

- i calcoli effettuati dimostrano che per l'aerogeneratore con caratteristiche geometriche riportate ai precedenti paragrafi, con altezza mozzo pari a 135 m, alla velocità massima di rotazione a pari a 12 rpm³, la distanza massima del punto d'impatto del baricentro di una pala distaccatasi dal rotore è circa 303 m;
- all'interno di un buffer di ampiezza pari alla gittata massima non ricade nessun recettore sensibile; ad esempio, le abitazioni censite ed accatastate si trovano sempre ad una distanza di molto superiore a 500 dagli aerogeneratori;

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 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.
- gli aerogeneratori sono dotati di un sistema di rilevamento del ghiaccio. Questo sistema evita il funzionamento della turbina sotto 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.

³ Dato fornito dal costruttore