



NOVEMBRE 2023

TORCELLO WIND S.r.l.

IMPIANTO EOLICO TORCELLO

PROVINCIA DI VITERBO

COMUNE DI BAGNOREGIO E LUBRIANO

Montana

ELABORATI TECNICI DI PROGETTO

ELABORATO R11 REV.1

ANALISI DELLA GITTATA MASSIMA

Progettista

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

Coordinamento

Corrado Pluchino

Codice elaborato

2799_4680_R18_Rev1_Relazione gittata massima.docx



Memorandum delle revisioni

Cod. Documento	Data	Tipo revisione	Redatto	Verificato	Approvato
2799_4680_R18_Rev0_Relazione gittata massima.docx	07/2022	Prima emissione	ML	C. Pluchino	L. Conti
2799_4680_R18_Rev1_Relazione gittata massima.docx	12/2023	Revisione integrazioni sul calcolo	AAM	C. Pluchino	L. Conti



Gruppo di lavoro

Nome e cognome	Ruolo nel gruppo di lavoro	N° ordine
Laura Conti	Direttore Tecnico - Progettista	Ord. Ing. Prov. PV n. 1726
Corrado Pluchino	Coordinamento Progettazione	Ord. Ing. Prov. MI n. A27174
Daniele Crespi	Coordinamento SIA	
Riccardo Festante	Tecnico competente in acustica	ENTECA n. 3965
Mauro Aires	Ingegnere Civile – Progettazione Strutture	Ord. Ing. Prov. Torino – n. 9583J
Matteo Lana	Ingegnere Ambientale	
Giuseppe Ferranti	Architetto – Progettazione Civile	Ord. Arch. Prov. Palermo – Sez. A Pianificatore Territoriale n. 6328
Sergio Alifano	Architetto	
Fabio Lassini	Ingegnere Civile Ambientale – Progettazione Civile	Ord. Ing. Prov. MI n. A29719
Vincenzo Gionti	Ingegnere Civile Ambientale – 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





<i>Andrea Fronteddu</i>	<i>Ingegnere Elettrico – Progettazione Elettrica</i>	<i>Ord. Ing. Cagliari n. 8788 – Sez. A</i>
<i>Matthew Piscedda</i>	<i>Esperto in Discipline Elettriche</i>	
<i>Davide Lo Conte</i>	<i>Geologo</i>	<i>Ordine Geologi Umbria n.445</i>
<i>Riccardo Baecker</i>	<i>Ingegnere Ambientale</i>	
<i>Elena Comi</i>	<i>Biologa – Esperto GIS – Esperto Ambientale</i>	<i>Ord. Nazionale Biologi n. 060746 Sez. A</i>
<i>Matteo Cuda</i>	<i>Naturalista</i>	
<i>Marco Corrù</i>	<i>Architetto</i>	
<i>Francesca Jaspardo</i>	<i>Esperto Ambientale</i>	
<i>Fabrizio Columbro</i>	<i>Ingegnere Ambientale</i>	
<i>Luca Morelli</i>	<i>Ingegnere Ambientale</i>	

Montana S.p.A.

Via Angelo Carlo Fumagalli 6, 20143 Milano
Tel. +39 02 54 11 81 73 | Fax +39 02 54 12 98 90

Milano (Sede Certificata ISO) | Brescia | Palermo | Cagliari | Roma | Siracusa

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

www.montanambiente.com





INDICE

1.	PREMESSA	5
1.1	DESCRIZIONE DELL'AREA D'INTERVENTO.....	6
2.	CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI.....	9
2.1	DESCRIZIONE GENERALE DI PROGETTO	9
2.2	APPROCCIO AL CALCOLO	10
2.3	IPOSTESI DI CALCOLO	12
2.4	VALIDAZIONE DEL MODELLO TEORICO	13
2.5	FORMULAZIONI	15
2.6	CASO STUDIO.....	17
2.7	CONSIDERAZIONI FINALI	19
3.	APPLICAZIONE DEI RISULTATI ALL'IMPIANTO EOLICO IN OGGETTO	20
4.	CONCLUSIONI	23

1. PREMESSA

Il presente elaborato costituisce la revisione 1 della relazione di calcolo della gittata massima del Progetto definitivo per la realizzazione del Parco Eolico “Torcello” sito nei comuni di Bagnoregio e Lubriano (VT), nell’area nord occidentale della regione Lazio sviluppato dalla società Torcello Wind S.r.l..



Figura 1.1 - Carta geografica del Lazio con ubicazione dell’impianto

Nel suo complesso il parco sarà composto da N° 7 aerogeneratori della potenza nominale di 6.0 MW ciascuno, da un cavi-dotto di MT interrato, da una Stazione elettrica di condivisione MT/AT, dalla viabilità di servizio interna, dalle reti tecnologiche per il controllo del parco e dalle opere di regimentazione delle acque meteoriche.

L’impianto in esame sarà del tipo collegato in rete e funzionerà quindi in parallelo alla rete elettrica nazionale.

La connessione alla linea elettrica nazionale è stata prevista, come da STMG 202002709 rilasciata da TERNA, in prossimità di una nuova stazione elettrica di futura realizzazione e già autorizzata, sita nel comune di Viterbo.

Il progetto si inquadra nell’ambito della ricerca di fonti energetiche alternative da utilizzare per la produzione di energia elettrica.

La presente revisione 1 della relazione sulla gittata massima actualizza ed aggiorna i risultati del precedente studio sulla gittata (Rif. 2799_4680_R18_Rev0_Relazione gittata massima__) sulla base di seguenti modifiche tecniche:

- a) Utilizzo di un foglio di calcolo della gittata più conservativo, 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 Regione Campania.
- b) Utilizzo di parametri di calcolo più precisi forniti direttamente dal costruttore.

1.1 DESCRIZIONE DELL'AREA D'INTERVENTO

L'intera area di realizzazione del parco in esame è ubicata in zone al di fuori dei centri abitati limitrofi e, per quanto riguarda l'area produttiva di installazione degli aerogeneratori, si estende in parte nel territorio comunale di Lubriano (torre B01 e torre B02) e in parte nel territorio del comune di Bagnoregio (torre B03÷B07).

La sottostazione di trasformazione sarà ubicata nel territorio comunale di Viterbo mentre la linea di connessione attraverserà, oltre ai comuni in cui sono posizionate le piazzole anche i territori comunali di Montefiascone, Celleno e Viterbo.

L'accesso al sito si ipotizza possa avvenire mediante strade pubbliche esistenti a carattere nazionale e regionale partendo dal vicino porto industriale di Civitavecchia. All'interno dell'area del parco, verranno utilizzate come viabilità primaria la Strada Regionale 71 TER, la Strada Provinciale 130, la Strada Provinciale 54 e la Strada per la località Tortolaio. Dalla viabilità primaria, le aree per la costruzione degli aerogeneratori saranno raggiunte mediante strade secondarie (asfaltate e/o sterrate) esistenti o mediante la realizzazione di apposite piste. Nella figura successiva si riporta una vista planimetrica della viabilità.

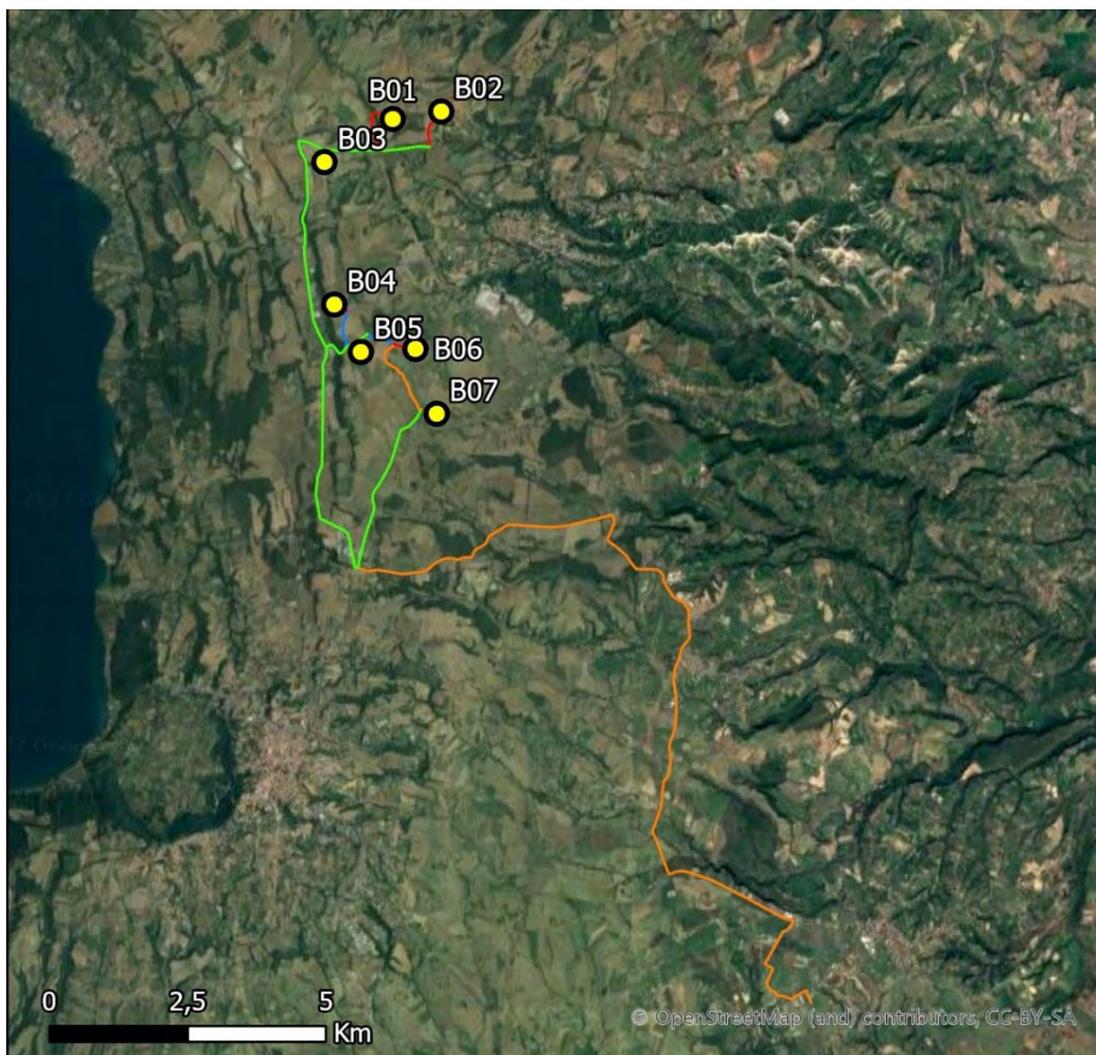


Figura 1.2 - Inquadramento generale dell'area di progetto e della viabilità (rosso=pista di accesso; blu=secondaria; verde=principale) e della connessione (linea arancio)

Le aree che si raggiungeranno con la viabilità sopra descritta, dove è prevista l'installazione delle pale eoliche, saranno in terreni di proprietà privata, per i quali si cercheranno appositi accordi con i proprietari.

Le infrastrutture a servizio del parco, strade, cavidotti e reti tecnologiche, interesseranno per la quasi totalità aree di proprietà pubblica (comunali, provinciali, statali e ministeriali), solo in alcuni tratti, il cavidotto potrebbero interessare catastalmente terreni privati.

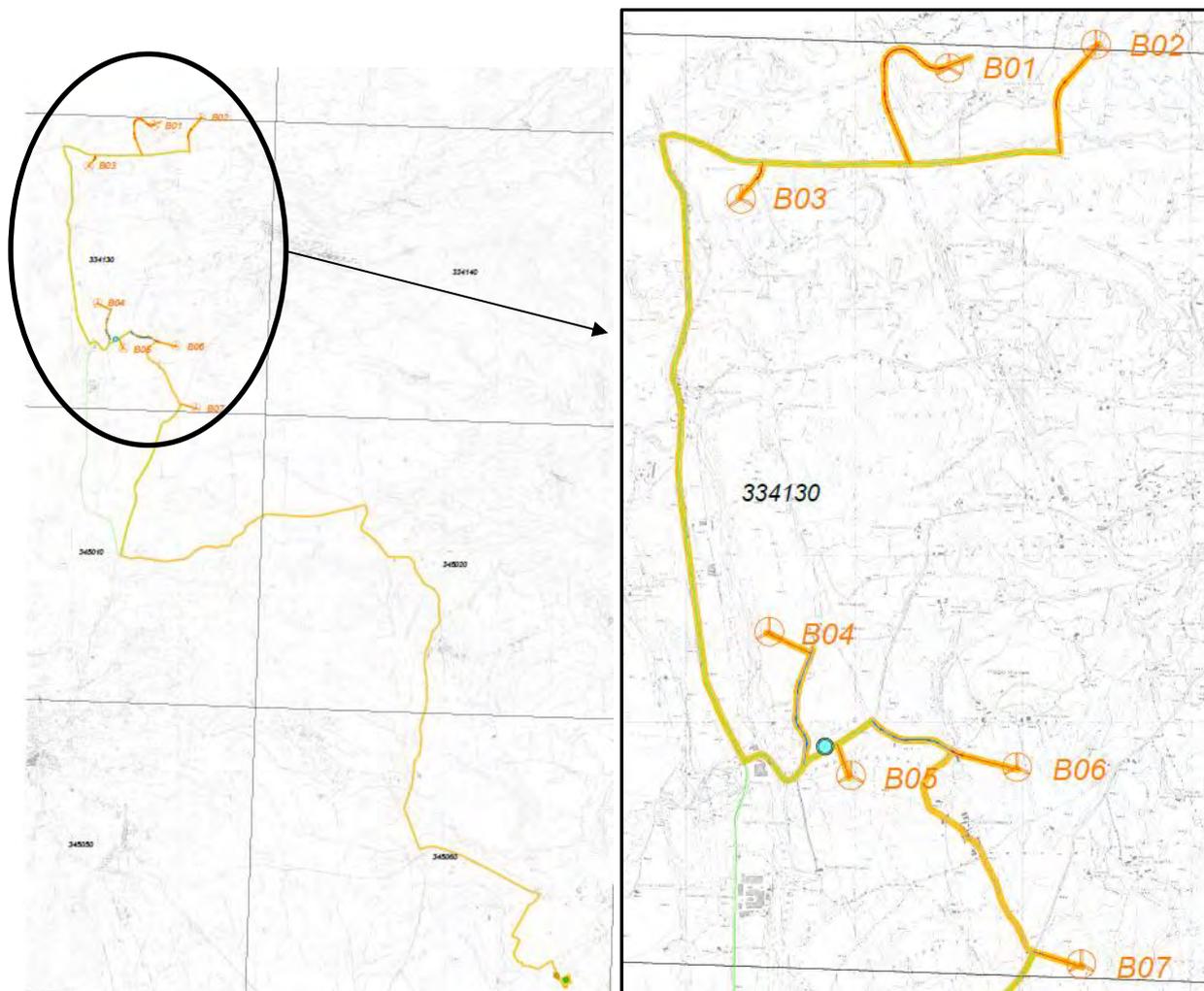


Figura 1.3 - Area impianto in progetto

Il Parco eolico si estende in zona compresa tra il lago di Bolsena e l'abitato di Bagnoregio, posto a circa 3 km in direzione est. Con una distribuzione Nord-Sud, il parco può essere suddiviso in due aree: una più a nord, comprendente gli aerogeneratori denominati B01, B02 e B03 situati in territorio con andamento collinare con quote altimetriche comprese tra 520 e 580 m slm; ed una più a sud, in cui sono riunite le torri B04, B05, B06 e B07, posizionate in territorio pianeggiante con quote altimetriche comprese tra 550 e 590 m

La realizzazione della Stazione Elettrica di condivisione MT/AT è invece prevista nel comune di Viterbo in prossimità della stazione elettrica TERNA di nuova realizzazione denominata "Piscinale" - Frazione di Grotte S. Stefano.



Il collegamento elettrico tra gli aerogeneratori e la sottostazione avverrà mediante un elettrodotto interrato che seguirà in gran parte il tracciato delle strade esistenti e in piccola parte il tracciato di quelle di nuova realizzazione (nuove strade di interconnessione degli aerogeneratori e strada di accesso alla sottostazione elettrica).

Nella seguente tabella si riportano le coordinate dei 7 aerogeneratori in esame, mentre nei paragrafi successivi si descrivono dettagliatamente gli inquadramenti tecnici dell'area di progetto.

Tabella 1.1: Coordinate aerogeneratori

WTG	UTM – ZONA 33T		GAUSS BOAGA	
	m Est	m Nord	m Est	m Nord
-				
B01	258554,27	4725906,30	2278557,78	4725918,27
B02	259424,84	4726046,41	2279428,36	4726058,39
B03	257321,30	4725122,06	2277324,78	4725134,03
B04	257488,51	4722531,26	2277491,99	4722543,17
B05	257972,74	4721670,68	2277976,22	4721682,58
B06	258957,58	4721720,94	2278961,08	4721732,84
B07	259339,23	4720541,16	2279342,74	4720553,04

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 nello specifico "Siemens Gamesa SG 6.0-170" da installare nel parco eolico ubicato nei Comuni di Bagnoregio (VT) e Lubriano, nell'area nordoccidentale della regione Lazio, costituito da n. 7 aerogeneratori per una potenza complessiva pari a 42 MW.

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

Tabella 2.1: Caratteristiche tecniche aerogeneratore Siemens Gamesa SG 6.0-170.

AEROGENERATORE SIEMENS GAMESA SG 6.0 - 170	
DATI DI FUNZIONAMENTO	
Potenza nominale	6.000 kW
Velocità minima del vento	3.0 m/s
Velocità massima del vento	25.0 m/s
Classe di vento-IEC	IIIA
ROTORE	
Diametro del rotore	170 m
Area spazzata	22.698 mq
Velocità massima	8,83 giri/min
TORRE	
Tipo	Torre in acciaio tubolare
Altezza mozzo	115 m
Altezza al Top	200 m
PALA	
Lunghezza	83,5 m
Numero pale	3
Materiale	G (Glassfiber) – CRP (Carbon Reinforced Plastic)
DATI ELETTRICI	
Frequenza	50Hz/60Hz
Voltaggio	690 V
Tipo generatore	doubly-fed asynchronous three phase 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 2.1).

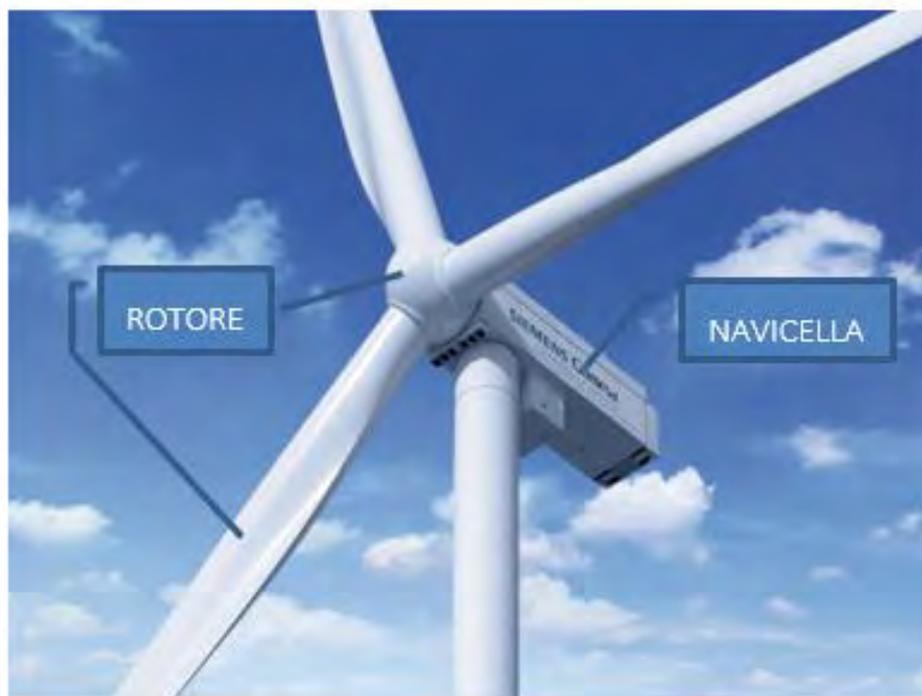


Figura 2.1: Rappresentazione di un aerogeneratore.

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 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 2.2).

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

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

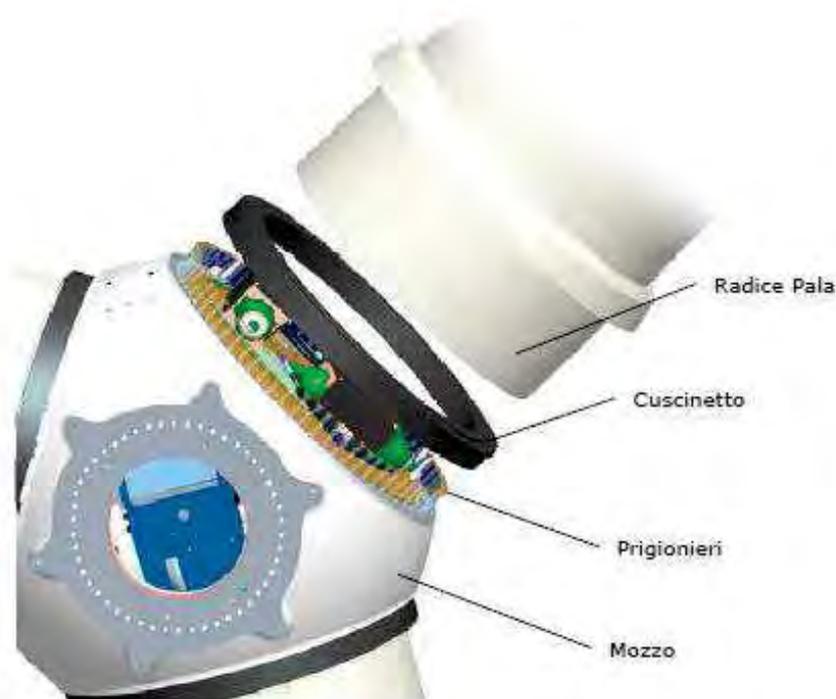


Figura 2.2: particolare mozzo aerogeneratore.

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.

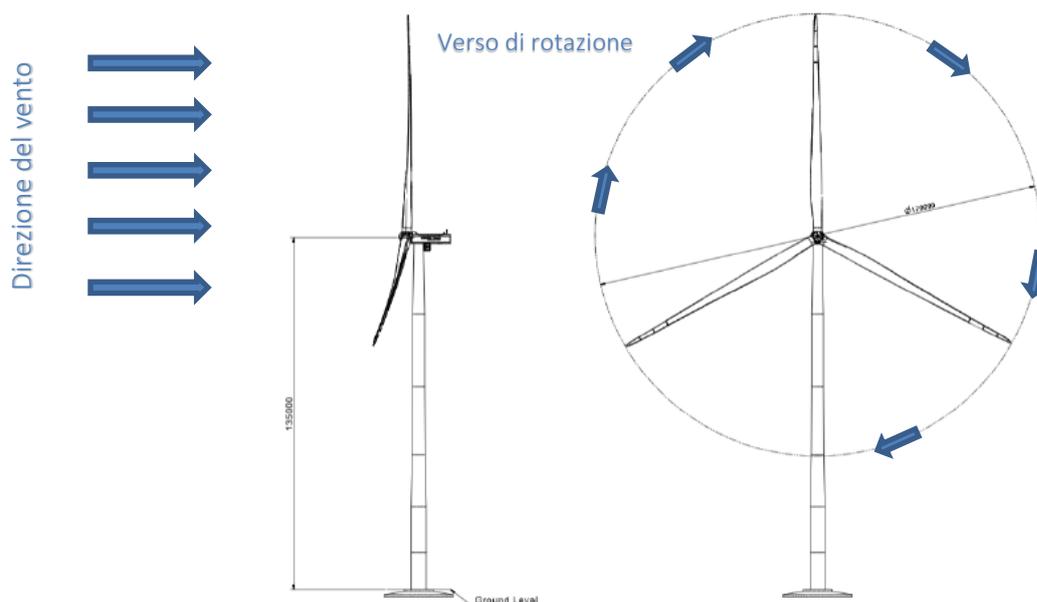


Figura 2.3: Schematizzazione Verso di Rotazione / Direzione del vento.

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 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 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:

- o dal numero di giri del rotore e quindi dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;
- o dalla posizione della pala nel momento del distacco;
- o dalla dimensione del frammento;
- o dal peso del frammento (più leggero è, più il suo moto è limitato dalle forze di attrito viscoso);
- o 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 viscoso;
- la seconda include le forze viscoso;
- 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: 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 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 FORMULAZIONI

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

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)

$HG = H_{torre} + Y_g$

$Y_g = rg \sin \alpha$

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

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

$v_{y0} = v_0 \sin(90-\alpha) = v_0 \cos \alpha$
 $v_0 = \omega r g = (2\pi n r g)/60$
 $n = \text{numero di giri al minuto del rotore}$
 $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità.

Da cui si calcola la Gittata effettiva (Geff) dalla formula:

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

dove: $Lg = 2/3 L$

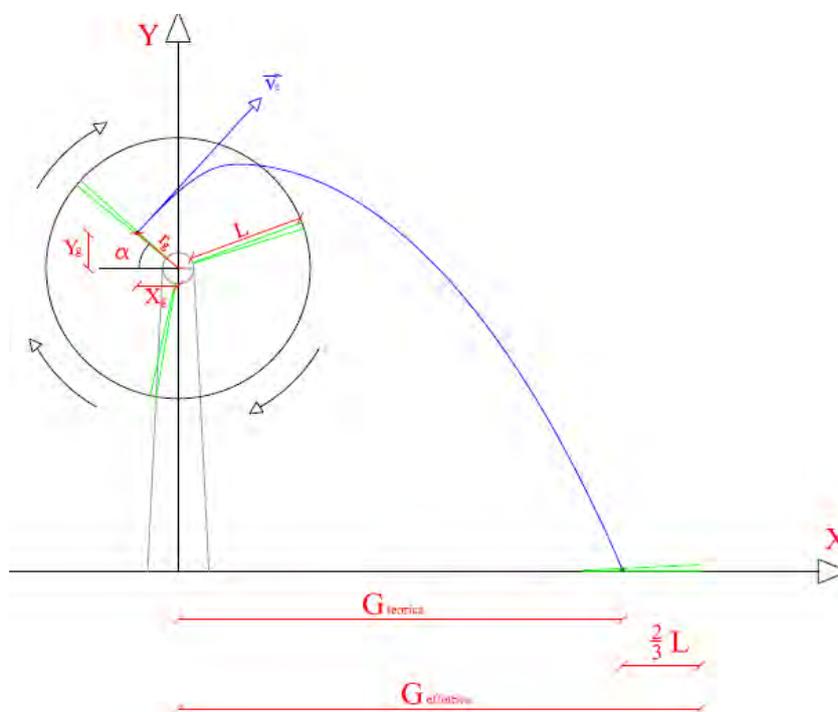


Figura 2.4: Schema della Gittata per angolo compreso tra 0° e 90°.

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 2.5)

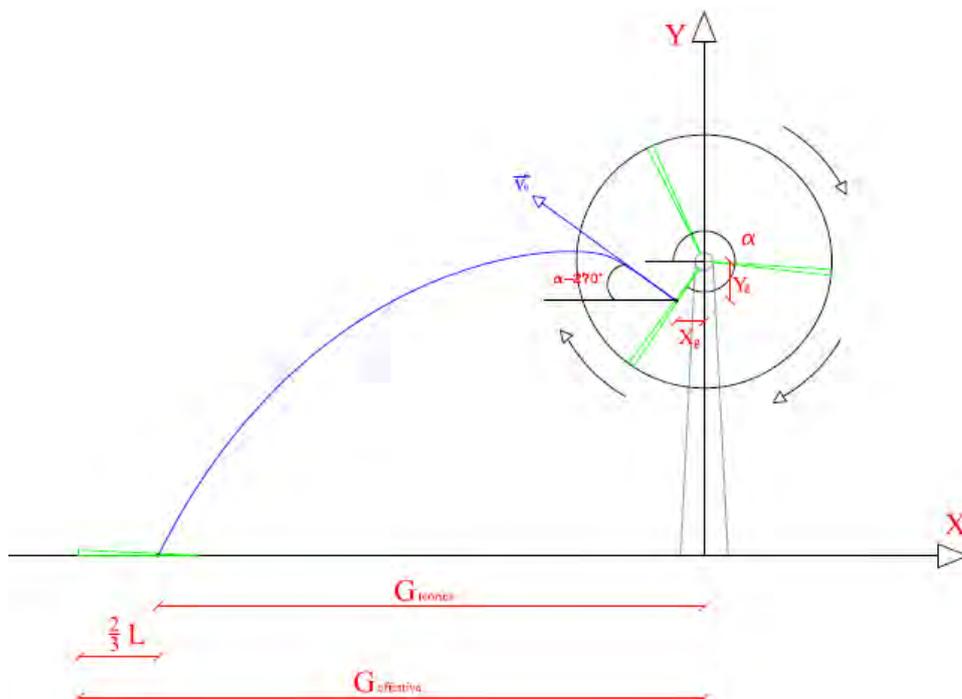


Figura 2.5: Schema della Gittata per angolo compreso tra 270° e 360° .

2.6 CASO STUDIO

Di seguito si riporta il calcolo delle gittate per il caso studio relativo ad un aerogeneratore Siemens Gamesa SG 6.0 -170 con altezza mozzo 115m.

In Tabella 2.3 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 SIEMENS GAMESA SG 6.0-170	
ELEMENTO	DIMENSIONE
Lunghezza pala	83,5 [m]
Velocità rotazione massima	8,83 [rpm]
Altezza mozzo	115,0 [m]
Posizione baricentro rispetto al mozzo	28,67 [m]
Diametro del rotore	170 [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 – Caso1 velocità 8,83 giri/min

PARAMETRO CALCOLATO	[1] ANGOLI COMPRESI TRA 0° E 90°	[2] ANGOLI COMPRESI TRA 270° E 360°
Angolo α	72°	308°
V_0	29,19 m/s	29,18 m/s
V_{x0}	27,76 m/s	23,00 m/s
V_{y0}	9,02 m/s	17,97 m/s
Gittata teorica	168,86 m	168,79 m
Lg	55,53 m	55,53 m
Gittata Effettiva	224,39 m	224,32 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 2.6.



Figura 2.6: Calcolo Gittata Effettiva vs. angolo di distacco¹

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 il caso 1 con velocità pari a 8,83 giri/min si evince un valore della gittata massima pari a circa 169 m per un angolo di distacco pari a 72° circa, al quale dovrà aggiungersi la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno della pala, 55.53 m, per un valore complessivo precauzionalmente arrotondato in:

$$G_{\text{eff}} = 225 \text{ m}$$

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 2.2)

¹ si rimanda al paragrafo 2.5 per la definizione delle traiettorie

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 225 m dall'asse degli aerogeneratori stessi (Figura 3.1).

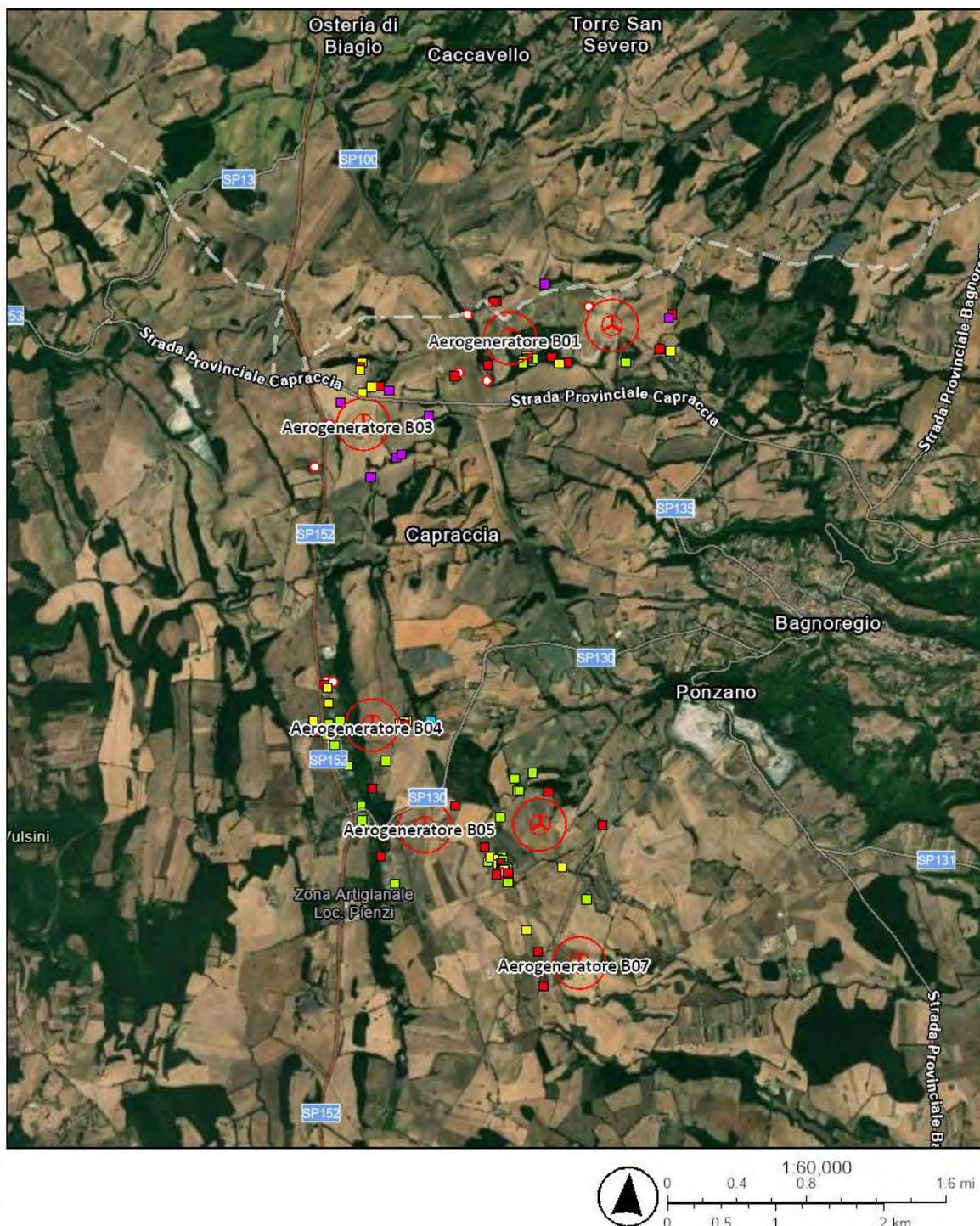


Figura 3.1: Layout di progetto con buffer della gittata massima di distacco di una pala.



Figura 3.2: Legenda delle figure 3.1-3.3.

Nelle sottostanti figure 3.2 e 3.3 si riportano in scala più dettagliata i risultati grafici dello studio.



Figura 3.3: Figura 3.4: Dettaglio aerogeneratori B01-03.



Figura 3.5: Dettaglio aerogeneratori B04-07.

Nella tabella sottostante, si riportano le distanze minime tra i recettori suddivisi in due categorie: Fabbricati e Strade ad ampio traffico veicolare quali strade comunali/provinciali /statali.

Tabella 3.1: Verifica di interferenza con i recettori

WTG		ANALISI RECETTORI			
ID	Gittata effettiva (m)	Distanza minima da Fabbricati (m)	Categoria catastale	Distanza minima da Viabilità (m)	Categoria stradale
B01	225	233	A03	550	SP54
B02	225	453	A05	610	SP54
B03	225	265	F02	222	SP54
B04	225	283	A02	398	SP152
B05	225	315	A02	200	SP130
B06	225	291	A03	880	SP130
B07	225	360	A03	2050	SP152

Nel successivo capitolo si riportano le considerazioni conclusive del presente studio che tiene anche conto di un errore teorico dovuto al rilievo di campo con metodi speditivi e l'errore di scala nelle rappresentazioni cartografiche; tale errore è stimato in +/- 3% del valore della gittata.

Pertanto, al buffer 225m bisogna aggiungere o togliere un'alea di 6,7 m all'interno della quale se vi ricadessero dei recettori sulle mappe presentate non c'è certezza della corrispondenza esatta in campo.



4. CONCLUSIONI

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

- i calcoli effettuati dimostrano che per l'aerogeneratore Modello Siemens Gamesa SG 6.0-170 con altezza mozzo pari a 115 m, alla velocità massima di rotazione pari a 8,83 rpm², la distanza massima del punto d'impatto del baricentro di una pala distaccatasi dal rotore è circa 225 m;
- all'interno di un buffer di ampiezza pari alla gittata massima di 225m (+/- 6,7m di alea) non ricade nessun recettore sensibile. Il recettore viabilità più vicino alla gittata massima di distacco è posizionato a circa 220 metri dall'aerogeneratore B05; il recettore fabbricato più vicino alla gittata massima di distacco è posizionato a circa 233 metri dall'aerogeneratore B01.

Va altresì considerato che:

- la gittata massima teorica qui calcolata, non tiene conto delle forze viscosse che naturalmente ci sarebbero in caso di rottura reale di uno spezzone di pala e che gli studi dei costruttori dimostrano che queste forze incidono significativamente nel valore di gittata massima, riducendolo di almeno il 20%;
- 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 è 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;
- l'esperienza delle case costruttrici ha dimostrato che 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.

² Dato fornito dal costruttore