

REGIONE BASILICATA  
PROVINCIA DI POTENZA

Comuni di:

Muro Lucano - Bella - Balvano- Baragiano

LOCALITA' "Monte Raitiello"

# PROGETTO DEFINITIVO DI ADEGUAMENTO TECNICO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO DI PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE - 12 AEROGENERATORI

Progetto originario a 25 aerogeneratori autorizzato con DGR N° 1415 del 23/10/12

Sezione 6:  
RELAZIONI SPECIALISTICHE

Titolo elaborato:  
**RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA**

N. Elaborato: **6.3**

Scala: -

Proponente

## MONTE RAITIELLO Srl

Via della Tecnica, 18 - 85100 - Potenza (PZ)  
CF 01531560769  
monteraitiello@pec.it

Legale Rappresentante  
**Donato Macchia**

Progettazione



**sede legale e operativa**

San Giorgio Del Sannio (BN) via de Gasperi 61

**sede operativa**

Lucera (FG) S.S.17 loc. Vaccarella snc c/o Villaggio Don Bosco  
P.IVA 01465940623

**Azienda con sistema gestione qualità Certificato N. 50 100 11873**



Progettista

**Dott. Ing. Nicola Forte**



Rev.	Data	Elaborazione	Approvazione	Emissione	DESCRIZIONE
00	OTTOBRE 2023	VC sigla	PM sigla	NF sigla	EMISSIONE
					DESCRIZIONE
Nome File sorgente	GE.AGB01.PDV.6.3.R00.doc	Nome file stampa	GE.AGB01.PDV.6.3.R00.pdf	Formato di stampa	A4

 <b>TENPROJECT</b>	<b>Relazione di calcolo della gittata</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.AGB01.PDV.6.3.R00 28/02/2023 17/11/2023 01 2 di 12
---	---	---	---

## Sommario

1	INTRODUZIONE .....	3
2	METODOLOGIA DI CALCOLO DELLA GITTATA .....	4
3	CALCOLO DELLA GITTATA PER L'AEROGENERATORE DI PROGETTO .....	9
4	COMPATIBILITÀ DEL PROGETTO IN RELAZIONE AGLI ELEMENTI ANTROPICI PRESENTI.....	11
5	CONCLUSIONI.....	12

 <b>TENPROJECT</b>	<b>Relazione di calcolo della gittata</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.AGB01.PDV.6.3.R00 28/02/2023 17/11/2023 01 3 di 12
---	---	---	---

## 1 INTRODUZIONE

La presente relazione riguarda l'adeguamento tecnico che la società Monte Raitiello srl ha deciso di proporre al proprio progetto di impianto eolico già autorizzato con DGR n. 1415 del 23/10/2012 emanato dalla Regione Basilicata.

Nello specifico, con DGR n. 1415 del 23/10/2012 la Regione Basilicata ha autorizzato la costruzione e l'esercizio di un parco eolico di potenza nominale pari a 55,80 MW costituito da 25 aerogeneratori (Parco Eolico) di cui n.18 (da 2,00 MW di potenza ognuna), n.6 (da 3,00 MW di potenza ognuna) e n.1 (da 1,80 MW di potenza ognuna), da ubicare alla località "Monte Raitiello" in agro del Comune di Muro Lucano (PZ) e, delle relative opere connesse ed infrastrutture indispensabili di collegamento (Impianti di rete e di utenza) alla RTN gestita da Terna Rete Italia S.r.l. localizzate nel Comune di Balvano (PZ).

La proposta di adeguamento tecnico dell'impianto eolico autorizzato consiste in:

- Riduzione del numero di aerogeneratori (da 25 a 12)
- Cambio del modello di aerogeneratore (passaggio dal modello Vestas V90 con diametro 90 m e altezza al mozzo 95 m, al modello Vestas V150 con diametro 150 m e altezza al mozzo 105 m, ad eccezione di un'unica turbina di modello Vestas V136 con diametro 136 m e altezza al mozzo 82 m), mantenendo invariato il posizionamento degli aerogeneratori con incremento della potenza unitaria di macchina. È prevista, infatti, l'installazione di 12 aerogeneratori di potenza nominale pari a 4.5 MW.

L'adeguamento tecnico proposto contempla, dunque, la diminuzione sia del numero degli aerogeneratori che delle opere connesse. Esso, inoltre, determina un aumento della produzione. Pertanto, risulta perfettamente in linea con le finalità, di miglioramento del rendimento e delle prestazioni ambientali, indicate all'art.6, comma 9, del D. Lgs. 3 aprile 2006, n.152.

La diminuzione del numero di aerogeneratori è anche perfettamente in linea con la Strategia Energetica Nazionale 2017 adottata con D.M. del 10/11/2017 del MISE e del MASE (al tempo MAATM - paragrafo "Fonti rinnovabili, consumo di suolo e tutela del paesaggio") e con la politica energetica che esprimono chiaramente il favore, sia a livello nazionale che regionale, per l'utilizzo di macchine di potenza unitaria maggiore, in quanto consentono minor consumo del territorio e minor impatto paesaggistico.

In definitiva, in ragione del fatto che l'adeguamento tecnico proposto non comporta impatti ambientali significativi e negativi, è stata predisposta tutta la documentazione per l'espletamento della valutazione preliminare di cui all'art. 6, comma 9 del D.Lgs. 152/2006 e ss.m.ii presso il MASE.

Di seguito si dimostrerà l'assenza di potenziali impatti ambientali significativi e negativi aggiuntivi rispetto al progetto autorizzato, in linea con quanto previsto al comma 9 dell'art.6 del D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii e la compatibilità degli adeguamenti proposti con le norme di tutela dell'ambiente e del paesaggio: le condizioni di compatibilità già rilevate in sede di autorizzazione del progetto persistono anche, e maggiormente, in relazione all'adeguamento migliorativo proposto.



## 2 METODOLOGIA DI CALCOLO DELLA GITTATA

La valutazione della gittata massima corrispondente al distacco di una pala del rotore di un aerogeneratore viene effettuato risolvendo il sistema di equazioni rappresentative del moto, nelle quali vengono espressi gli effetti dinamici indotti dalle forze agenti sul corpo stesso (forza peso, azione del vento, reazione di attrito dell'aria), adottando specifiche condizioni al contorno cautelative che permettono di valutare i risultati con adeguato margine di sicurezza.

Le condizioni al contorno considerate nel calcolo sono le seguenti:

- Densità dell'aria  $1,04 \text{ kg/m}^3$  (valor minimo per il sito arrotondato per difetto in favore di sicurezza e calcolato all'altezza massima della pala alla temperatura di  $35^\circ$ );
- Velocità del vento  $25 \text{ m/s}$ , corrispondente alla massima velocità di rotazione ammessa prima che vengano automaticamente messe in stallo le pale;
- Velocità di rotazione della pala corrispondente al valore di velocità di rotazione del rotore massima consentita per il modello di aerogeneratore di progetto.

Tali valori sono rappresentativi di ipotesi cautelative in quanto corrispondenti a valori di condizioni al contorno che massimizzano la gittata.

Il sistema di riferimento adottato è riportato nella seguente figura:

- Asse X coincidente con la retta orizzontale passante per la base della torre e ortogonale all'asse di rotazione delle pale,
- Asse Y coincidente con la retta orizzontale passante per la base della torre, e parallelo all'asse di rotazione delle pale,
- Asse Z coincidente con l'asse della torre.

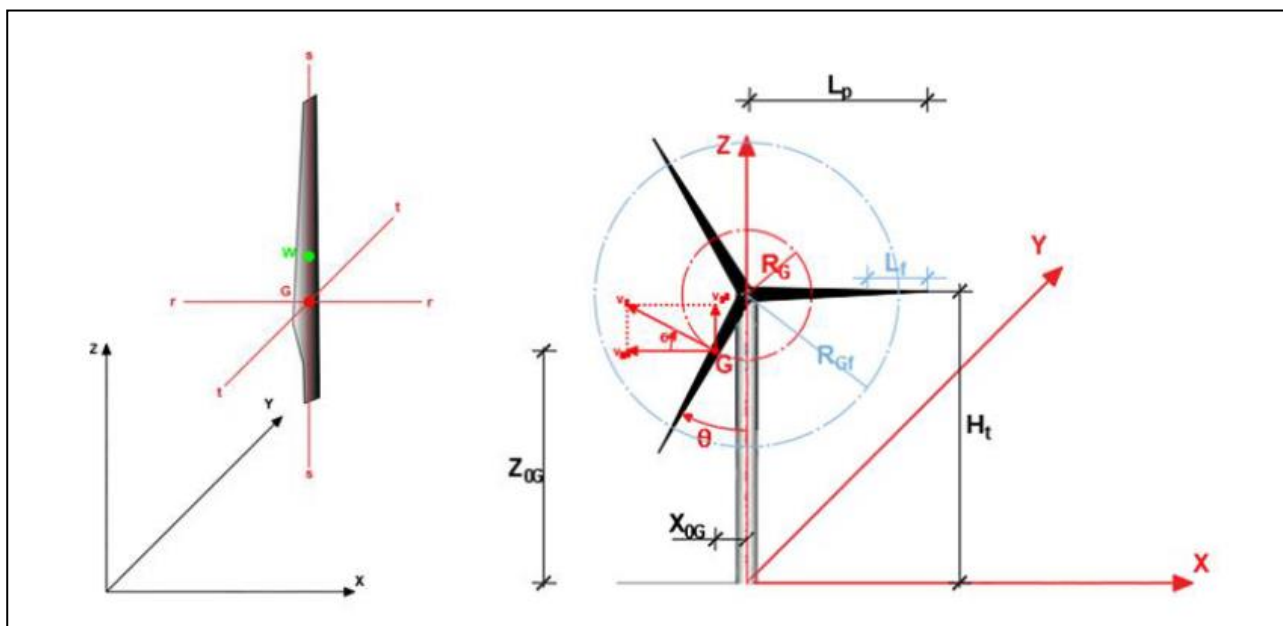



Figura 1: Schema del sistema di riferimento considerato

 <b>TENPROJECT</b>	<b>Relazione di calcolo della gittata</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.AGB01.PDV.6.3.R00 28/02/2023 17/11/2023 01 5 di 12
---	---	---	---

In condizioni di regime normale il vento agisce in direzione ortogonale al piano delle pale, secondo una direzione parallela all'asse Y e induce la rotazione del rotore nel piano XZ con velocità angolare costante  $\omega$ . Le pale del rotore dunque ruotando descrivono una circonferenza di raggio  $R_P$ , mentre il baricentro G della singola pala descrive una circonferenza di raggio  $R_G$ , usualmente ritenuto pari a circa 1/3 di  $R_P$  (baricentro, ubicato a circa 1/3 della lunghezza della pala).

La pala non subisce rotazioni rispetto agli assi r-r, s-s, t-t.

In tali condizioni le caratteristiche geometriche e cinematiche del moto del baricentro di una specifica pala possono essere espresse in funzione dell'angolo  $\vartheta$ , formato tra l'asse della torre e l'asse longitudinale della pala:

La posizione del baricentro G ( $X_{0G}$ ,  $Y_{0G}$ ,  $Z_{0G}$ ):

$$X_{0G} = R_G \sin \theta ; \quad Y_{0G} = 0 ; \quad Z_{0G} = H_t - R_G \cos \theta \quad \text{con } R_G = \frac{1}{3} R_P$$

la velocità  $V_{0G}$  del baricentro G ha direzione ortogonale all'asse longitudinale della pala, in quanto tangente alla circonferenza di raggio  $R_G$ , verso coerente con quello di rotazione  $\omega$  e componenti  $v_{0X}$ ,  $v_{0Y}$ ,  $v_{0Z}$ :

$$v_{0X} = -v_{0G} \sin \theta ; \quad v_{0Y} = 0 ; \quad v_{0Z} = v_{0G} \cos \theta \quad \text{con } v_{0G} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega}{60} R_G$$

Al variare della posizione angolare della pala, descritta dall'angolo  $\vartheta$ , cambiano, quindi, le condizioni cinematiche e la posizione del baricentro.

In condizioni di distacco della pala le relazioni precedentemente descritte e le relative grandezze fisiche che esse rappresentano corrispondono, quindi, alle condizioni di inizio distacco, coincidenti con l'origine dei tempi ( $t=0$ ), mentre il successivo moto descritto dalla pala distaccata ( $t>0$ ) richiede una trattazione più complessa nella quale viene considerata l'analisi tridimensionale del moto rotazionale di un corpo di dimensioni non trascurabili che si muove ruotando attorno al proprio baricentro rispetto ai tre assi ortogonali di riferimento (r-r, s-s, t-t) e traslando nelle direzioni degli assi X, Y, Z.

Nel caso della stima del valore della gittata massima, possono essere utilizzati modelli semplificati che assimilano il moto a quello irrotazionale di un corpo puntiforme avente massa e centro di gravità coincidenti con quelli dell'oggetto distaccato e assoggettato alle forze aerodinamiche agenti su di esso.

Tale metodologia consente lo sviluppo di calcoli più agili garantendo ottimi margini di approssimazione ed assicura valutazioni ampiamente cautelative e, quindi, a vantaggio di sicurezza, in quanto le azioni trascurate indurrebbero comunque ulteriori dissipazioni e ridurrebbero i valori di gittata massima.

Il modello di calcolo prevede che sul baricentro della pala agiscano le seguenti forze:

- la forza peso  $F_g$ , che ha direzione lungo l'asse Z e verso negativo:  
 $F_g = m \cdot g$  in cui  $m$  è la massa della pala e  $g$  è l'accelerazione di gravità
- la resistenza aerodinamica  $F_v$ , che ha direzione analoga a quella del vettore velocità  $v$  di traslazione della pala, ma verso contrario. Assumendo che la pala nel loro moto, ruotino progressivamente attorno al loro asse t-t, conservando sempre direzione ortogonale alla componente della velocità nel piano X-Z si può esprimere la resistenza aerodinamica nelle sue componenti principali, corrispondenti al moto traslatorio nel piano X-Z ed Y-Z:



$$F_{xz} = -\frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot S \cdot v_{xz}^2 ; \quad F_y = -\frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot S \cdot (w - v_y)^2$$

In cui  $v_{xz}$  è ottenuta come somma delle componenti della velocità lungo X ed Y:

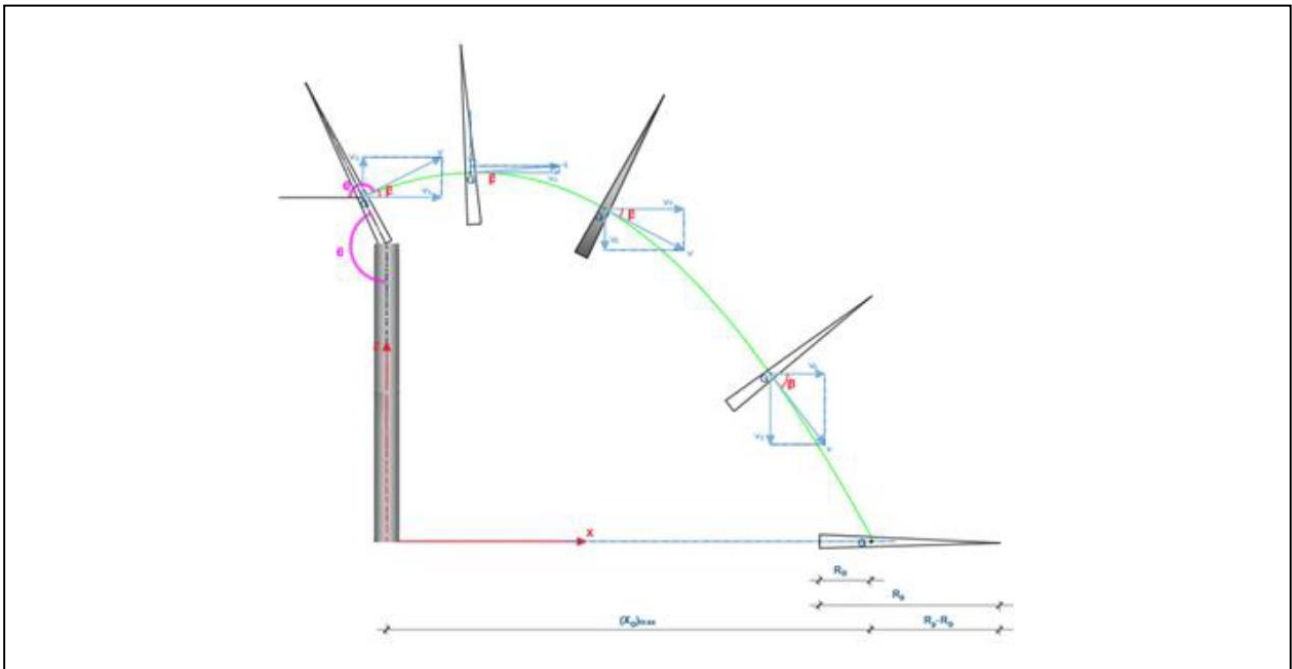
$$v_{xz} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad \text{con } \tan \beta = \frac{v_z}{v_x}$$

Avendo indicato con:

- C il coefficiente di resistenza aerodinamica dell'intera pala
- $\rho$  la densità dell'aria, che è funzione della temperatura e della quota sul livello del mare e si può assumere cautelativamente pari a 1,03 kg/m<sup>3</sup>,
- S la superficie maestra della pala ortogonale alla direzione del moto,
- $v_{xz}$  e  $v_y$  le componenti della velocità  $v$  di traslazione della pala rispettivamente nel piano xz, e lungo la direzione y,
- w la velocità del vento assunta pari a 25 m/s, corrispondente alla massima velocità prima che vengano automaticamente poste in stallo le pale,


$\beta$  è l'angolo tra la direzione della velocità  $v_{xz}$  e la sua proiezione nella direzione parallela all'asse X. Avendo ipotizzato costanti i coefficienti C,  $\rho$  e S si possono esprimere le componenti della forza d'attrito lungo X e Z come:

$$F_x = F_{xz} \cdot \cos \beta \quad ; \quad F_z = F_{xz} \cdot \sin \beta$$



**Figura 2: Schema di riferimento considerato**

Quindi, applicando il secondo principio della dinamica è possibile scrivere, nel generico istante t, le equazioni di moto in ciascuna delle direzioni principali:

 <b>TENPROJECT</b>	<b>Relazione di calcolo della gittata</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.AGB01.PDV.6.3.R00 28/02/2023 17/11/2023 01 7 di 12
---	---	---	---

- Lungo la direzione X, sul corpo di massa  $m$  dotato di una certa velocità  $v_x$  agirà l'azione della resistenza dell'aria  $F_x$  (sempre di verso opposto alla direzione della velocità di traslazione) e quindi il corpo subisce un'accelerazione  $a_x$ :

$$m \cdot a_x(t) = -F_{xz}(t) \cdot \cos \beta(t)$$

- Lungo la direzione Y, sul corpo di massa  $m$  dotato di una certa velocità  $v_y$  agirà l'azione della resistenza dell'aria  $F_y$  (sempre di verso opposto alla direzione della velocità di traslazione) e quindi il corpo subisce un'accelerazione  $a_y$ :

$$m \cdot a_y(t) = -F_y(t)$$

- Lungo la direzione Z, sul corpo di massa  $m$  dotato di una certa velocità  $v_z$  agiranno l'azione della resistenza dell'aria  $F_z$  (sempre di verso opposto alla direzione della velocità di traslazione) e l'azione della forza peso  $-m \cdot g$ ; quindi, il corpo subisce un'accelerazione  $a_z$ :

$$m \cdot a_z(t) = -F_{xz}(t) \cdot \sin \beta(t) - m \cdot g$$

Tali equazioni permettono di ricavare i valori delle accelerazioni  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ , nelle direzioni degli assi principali di riferimento X,Y, Z.

Conseguentemente le componenti della velocità  $v$  risultano espresse dalle relazioni:

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + a_x(t) \cdot \Delta t$$

$$v_y(t + \Delta t) = v_y(t) + a_y(t) \cdot \Delta t$$

$$v_z(t + \Delta t) = v_z(t) + a_z(t) \cdot \Delta t$$

e le componenti dello spostamento dalle relazioni:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v_x(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_x(t) \cdot \Delta t^2$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + v_y(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_y(t) \cdot \Delta t^2$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) + v_z(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_z(t) \cdot \Delta t^2$$

Queste equazioni descrivono il moto della pala nel generico istante di tempo  $t$  e possono essere integrate a partire dall'istante di distacco assunto pari a zero ( $t_0=0$ ) adottando un procedimento alle differenze finite con un passo di integrazione sufficientemente piccolo.

In tale modo si ricavano le coordinate ( $X_t$ ,  $Y_t$ ,  $Z_t$ ) della traiettoria e le caratteristiche cinematiche del moto ( $v_{xt}$ ,  $v_{yt}$ ,  $v_{zt}$ ,  $a_{xt}$ ,  $a_{yt}$ ,  $a_{zt}$ ) in ogni istante e si valuta il tempo  $t_v$  (tempo di volo) per il quale il corpo giunge al suolo in corrispondenza del punto più lontano di coordinate ( $X_{max}$ ,  $Y_{tv}$ ,  $Z_{tv}=0$ ).

Ricavate le coordinate del punto di atterraggio della pala è necessario valutare la distanza vettoriale di detto punto dall'origine degli assi (0,0,0) coincidente con la base della torre, attraverso la relazione:

$$L_{tv} = \sqrt{x_{tv}^2 + y_{tv}^2}$$

 <b>TENPROJECT</b>	<b>Relazione di calcolo della gittata</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.AGB01.PDV.6.3.R00 28/02/2023 17/11/2023 01 8 di 12
---	---	---	---

La gittata vettoriale si ottiene quindi sommando, al valore  $L_{tv}$  ricavato, la distanza tra l'estremità dell'elemento ed il suo baricentro:


$$Gittata\ vettoriale\ della\ pala = L_{tv} + R_p - R_{Gp}$$

Indicando con il pedice p i termini riferiti alla pala.

Al variare della posizione assunta dalla pala (angolo  $\vartheta$ ) nell'istante del distacco ( $t_0=0$ ) cambiano le condizioni iniziali ( $X_{0G}$ ,  $Y_{0G}$ ,  $Z_{0G}$ ) e, con esse, tutti i parametri che definiscono la traiettoria seguita dalla pala stessa e, quindi, la distanza massima del punto di caduta dall'asse della torre stessa.

**La stima della gittata vettoriale massima si ottiene ripetendo il calcolo per differenti angoli iniziali ( $\vartheta$ ) ed individuando i parametri relativi alle condizioni più sfavorevoli.**



	<b>Relazione di calcolo della gittata</b>	Codice	GE.AGB01.PDV.6.3.R00
		Data creazione	28/02/2023
		Data ultima modif.	17/11/2023
		Revisione	01
		Pagina	9 di 12

### 3 CALCOLO DELLA GITTATA PER L'AEROGENERATORE DI PROGETTO

Nel seguito si procederà all'implementazione del modello fisico sopra descritto al fine di calcolare la gittata massima dell'intera pala per lo specifico modello di aerogeneratore previsto nell'adeguamento tecnico del progetto del parco eolico autorizzato: 11 torri **Vestas V150 con altezza al mozzo pari a 105 m e potenza 4500 kW**, e 1 torre **Vestas V136 con altezza al mozzo pari a 85 m e potenza 4500 kW**.

I dati geometrici e cinematici della **Vestas V150** sui quali è basato il calcolo sono dunque:

- Altezza del rotore dal livello del terreno: 105 m,
- Diametro del rotore: 150 m (lunghezza della pala 75 m),
- Velocità di rotazione: 12,6 giri/minuto.

È stata calcolata la gittata per diversi valori dell'angolo  $\vartheta$  compresi fra  $0^\circ$  e  $180^\circ$ .

I valori dell'angolo  $\vartheta$  maggiori di  $180^\circ$  sono esclusi dal calcolo in quanto per tali condizioni, essendo la componente lungo Z della velocità iniziale della pala orientata con verso il basso, si ha che in ogni caso i valori di gittata calcolati risulteranno inferiori a quelli ottenuti per le condizioni  $0^\circ < \vartheta < 180^\circ$ .

**Tabella 1: Sintesi dei risultati ottenuti per i diversi casi considerati**

	Pala intera
<b>Lunghezza [m]</b>	<b>75</b>
<b>Peso [kg]</b>	<b>16500</b>
<b>Superficie effic. [mq]</b>	<b>297</b>
<b>Tempo di volo [s]</b>	<b>6,8</b>
<b>Gittata massima [m]</b>	<b>183,3</b>

I dati geometrici e cinematici della **Vestas V136** sui quali è basato il calcolo sono dunque:

- Altezza del rotore dal livello del terreno: 82 m,
- Diametro del rotore: 136 m (lunghezza della pala 68 m),
- Velocità di rotazione: 14 giri/minuto.

È stata calcolata la gittata per diversi valori dell'angolo  $\vartheta$  compresi fra  $0^\circ$  e  $180^\circ$ .

I valori dell'angolo  $\vartheta$  maggiori di  $180^\circ$  sono esclusi dal calcolo in quanto per tali condizioni, essendo la componente lungo Z della velocità iniziale della pala orientata con verso il basso, si ha che in ogni caso i valori di gittata calcolati risulteranno inferiori a quelli ottenuti per le condizioni  $0^\circ < \vartheta < 180^\circ$ .

**Tabella 2: Sintesi dei risultati ottenuti per i diversi casi considerati**

	Pala intera
<b>Lunghezza [m]</b>	<b>68</b>
<b>Peso [kg]</b>	<b>14000</b>
<b>Superficie effic. [mq]</b>	<b>265</b>
<b>Tempo di volo [s]</b>	<b>6,4</b>
<b>Gittata massima [m]</b>	<b>167,9</b>

 <b>TENPROJECT</b>	<b>Relazione di calcolo della gittata</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.AGB01.PDV.6.3.R00 28/02/2023 17/11/2023 01 10 di 12
---	---	---	--

I valori dimensionali e di superficie e peso del profilo alare di progetto non disponibili come dati diretti e sono stati desunti da valutazioni sulle dimensioni e tecnologia strutturale.



## 4 COMPATIBILITÀ DEL PROGETTO IN RELAZIONE AGLI ELEMENTI ANTROPICI PRESENTI

Come dimostrato nel capitolo precedente, la gittata massima di una pala dell'aerogeneratore di progetto è pari a circa 183 m per le torri V150, mentre è pari a 170m per la V136. Tutti gli aerogeneratori sono ubicati a distanze superiori ai valori ottenuti per la gittata massima rispetto alle strade principali (statali, regionali e provinciali), rispetto alla viabilità comunale riportata in magenta nell'immagine a seguire e ai recettori prossimi al punto di installazione degli aerogeneratori. L'immagine a seguire indica in ciano il punto di caduta massimo della pala in caso di distacco.

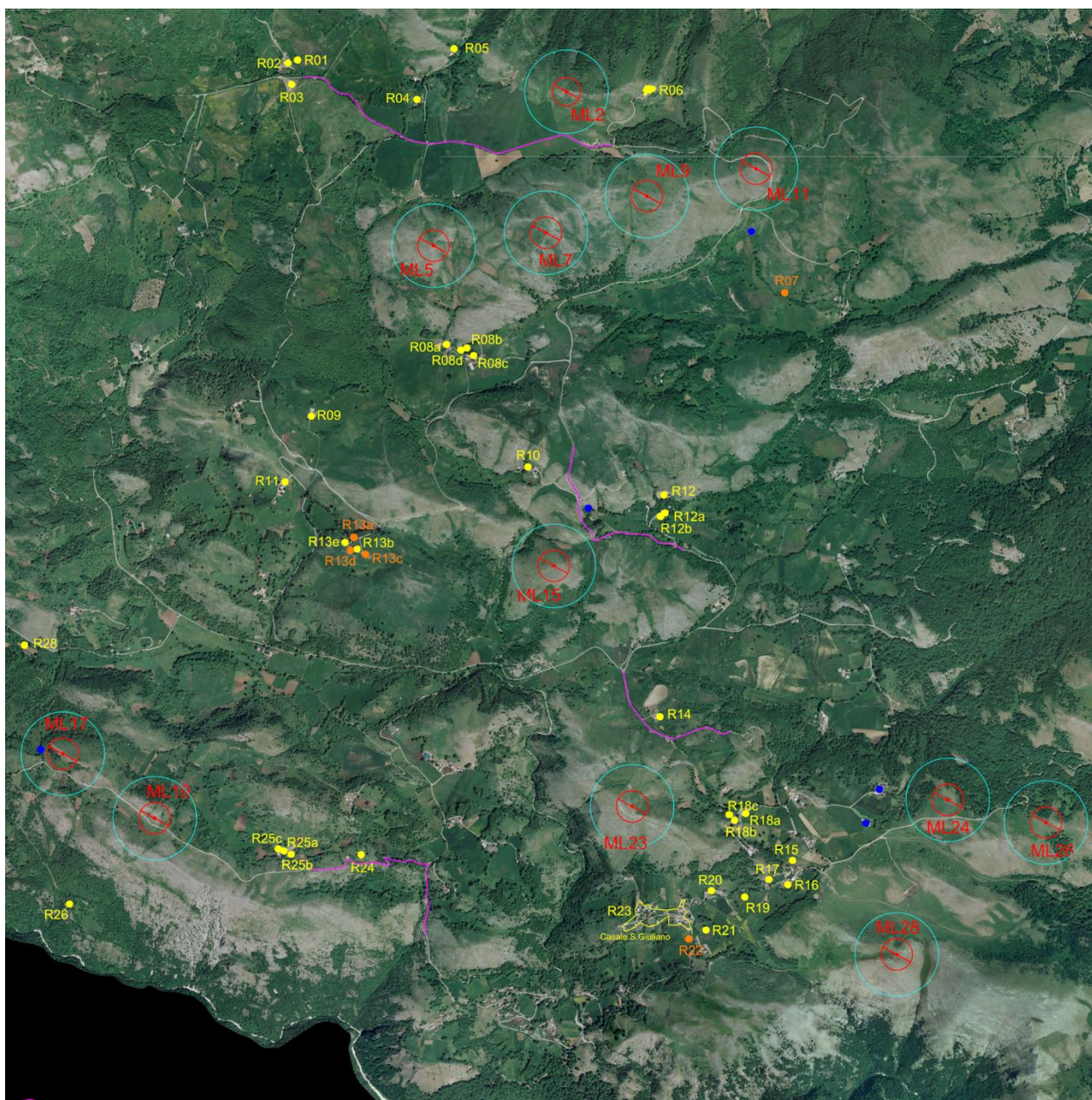


Figura 3: Planimetria con indicazione della massima gittata, dei recettori individuati

 <b>TENPROJECT</b>	<b>Relazione di calcolo della gittata</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.AGB01.PDV.6.3.R00 28/02/2023 17/11/2023 01 12 di 12
---	---	---	--

Si fa presente che, le strade principali più prossime agli aerogeneratori sono la Strada Provinciale SP10b, che dista circa 2,6km dalla torre ML28 e la Strada Statale SS7 che si trova a circa 2,7 km dalla torre ML2. Entrambe le distanze garantiscono ampiamente il rispetto della gittata massima calcolata.

## 5 CONCLUSIONI

Come illustrato per il calcolo della gittata sono stati utilizzati modelli semplificati che assimilano il moto della pala a quello irrotazionale di un corpo puntiforme avente massa e centro di gravità coincidenti con quelli dell'oggetto distaccato e assoggettato alle forze aerodinamiche agenti su di esso.

Tale metodologia consente lo sviluppo di calcoli più agili garantendo ottimi margini di approssimazione ed assicura valutazioni ampiamente cautelative e, quindi, a vantaggio di sicurezza, in quanto le azioni trascurate indurrebbero comunque ulteriori dissipazioni e ridurrebbero i valori di gittata massima.

Alla luce delle considerazioni esposte, è stato dimostrato che la distanza degli aerogeneratori di progetto dalle strade statali e provinciali e dai ricettori sensibili è più che adeguata rispetto alla gittata massima delle pale.