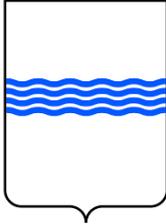


<b>REGIONE BASILICATA</b> 	<b>PROVINCIA DI POTENZA</b> 	<b>COMUNE DI BANZI</b> 
--	--	---

Denominazione impianto:	<b>“Piano Madama Giulia”</b>	
Ubicazione:	<b>Comune di Banzi (PZ)</b>	Fogli: vari
	<b>Località Piano Madama Giulia</b>	Particelle: varie

**PROGETTO DEFINITIVO**  
**di un parco eolico composto da n.10 aerogeneratori da 4MW per una potenza complessiva pari a 40 MW, da ubicarsi in agro del comune di Banzi (PZ) in località “Piano Madama Giulia”, delle opere connesse e delle infrastrutture indispensabili ricadenti nei comuni di Banzi (PZ) e Genzano di Lucania (PZ).**

<p><i>PROPONENTE</i></p> 	<p><b>CUBICO EDO S.R.L.</b></p> <p>Via Alessandro Manzoni n.43  20121 Milano (MI)  Partita IVA: 12914340968  Indirizzo PEC: cubicoedo@legalmail.it</p>
--	--

<b>ELABORATO</b>				Tav. n°	<b>A.7</b>	
<b>ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI</b>				Scala		
Aggiornamenti	Numero	Data	Motivo	Eseguito	Verificato	Approvato
	Rev 0	Ottobre 2023	Istanza VIA art.23 D.Lgs 152/06 – Istanza Autorizzazione Unica art.12 D.Lgs 387/03	ING. FORGIONE	ING. FORGIONE	CUBICO EDO SRL

<p><b>IL PROGETTISTA</b>  Dott. Ing. Donato Forgione  Via Raiale n.110/Bis  65128 PESCARA (PE)  Ordine degli Ingegneri di Pescara n. 1814  Email: donatoforgione@yahoo.it  Tel.: 3461042487</p> 	<p>Spazio riservato agli Enti</p>
---	-----------------------------------

**INDICE**

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
1.1 Metodologia ed ipotesi .....	3
1.2 Forze agenti sulla traiettoria pala .....	3
1.3 Esperienze e note statistiche.....	4
<b>2. LEGGE DEL MOTO .....</b>	<b>7</b>
<b>3. CALCOLO GITTATA DELLA PALA .....</b>	<b>8</b>
3.1 Calcolo del baricentro .....	9
3.2 Calcolo della velocità periferica.....	9
3.3 Calcolo di hG.....	10
3.4 Calcolo della gittata della pala .....	10
<b>4. CALCOLO GITTATA DEL FRAMMENTO DELLA PALA .....</b>	<b>11</b>
4.1 Calcolo del baricentro .....	12
4.2 Calcolo della velocità periferica.....	12
4.3 Calcolo di hG.....	13
4.4 Calcolo della gittata del frammento.....	13
<b>5. CALCOLO DELLA RIDUZIONE GITTATA PER RESISTENZA DELL'ARIA.....</b>	<b>14</b>
5.1 Calcolo della forza centrifuga .....	15
5.2 Calcolo della resistenza aerodinamica.....	15
5.3 Risultati.....	16
<b>6. ANALISI E SCELTA DEI RICETTORI SENSIBILI PRESENTI NELL'AREA DI IMPIANTO .....</b>	<b>16</b>
6.1 Fabbricati.....	16
6.2 Viabilità.....	18
<b>7. ANALISI DEL FATTORE DI RISCHIO NELLA DIREZIONE PERPENDICOLARE ALVENTO PREVALENTE.....</b>	<b>19</b>
<b>8. VERIFICA DI IMPATTO DELLA GITTATA MASSIMA.....</b>	<b>20</b>
8.1 Fabbricati.....	20
8.2 Strade.....	21
<b>9. CONCLUSIONI.....</b>	<b>21</b>
9.1 Fabbricati.....	21
9.2 Strade.....	21

**INDICE FIGURE E TABELLE**

<i>Figura 1 – Sistema coordinate (YY -- Flapwise, XX - Pitchwise. ZZ - Edgewise).....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2 – Componenti di una pala.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3 – Componenti del rotore.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 4 - Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 5: Individuazione planimetrica dei ricettori .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabella 1: Elenco dei ricettori presenti nel buffer di 500 m .....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 6: Viabilità interessata dal rischio di gittata nell'area dell'impianto.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7:Visuale verso Banzi .....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 8: Rosa dei Venti.....</i>	<i>20</i>

Progetto Definitivo di un parco eolico composto da n.10 aerogeneratori da 4MW per una potenza complessiva pari a 40 MW, da ubicarsi in agro del comune di Banzi (PZ) in località "Piano Madama Giulia", delle opere connesse e delle infrastrutture indispensabili ricadenti nei comuni di Banzi (PZ) e Genzano di Lucania (PZ).

---

*Tabella 2: Elenco dei ricettori rispetto all'aerogeneratore..... 20*

## 1. PREMESSA

La presente relazione si riferisce al calcolo della gittata massima in caso di rottura di una pala dell'aerogeneratore e/o frammento di esso, relativo alla proposta progettuale della ditta BANZI EDO S.r.l, sita nel comune di Banzi (PZ) in località "Piano Madama Giulia", calcolo eseguito al fine di prevedere possibili problemi che una simile eventualità, per quanto improbabile, possa procurare danno a cose e/o persone.

Nei paragrafi seguenti è riportata la procedura di prima approssimazione seguita per il calcolo della gittata massima, considerando un angolo di lancio variabile, sia di una pala che di una parte terminale di essa di mt 5 relativamente al seguente aerogeneratore:

<b>Tipo WTG</b>
VESTAS V150 – 4 MW

e ci si è posti nell'ipotesi di distacco della stessa nel punto di attacco sul mozzo, punto di maggioriesollecitazione, per evidente effetto di intaglio dovuto al collegamento.

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo in esame, sono le più gravose possibili, in modo darci nella situazione maggiormente cautelativa.

### 1.1 Metodologia ed ipotesi

Per il calcolo della massima gittata si considerano le seguenti ipotesi:

- *Il moto del sistema considerato è quello di un sistema rigido non vincolato (modello che approssima la pala nel momento del distacco);*
- *Si è considerata la riduzione della velocità periferica pari al 30% per tener conto degli effetti della resistenza dovuta al mezzo in cui si svolge il moto (aria) e per considerare le forze di resistenza che si generano al momento di rottura della pala;*

Il calcolo della gittata è stato determinato per diversi valori dell'angolo  $\theta$ ;

La velocità massima del rotore sarà limitata elettronicamente.

I dati geometrici e cinematici sui quali è basato il calcolo sono i seguenti.

- *Altezza della torre  $H = 123\text{ m}$*
- *Diametro del rotore  $D = 150\text{ m}$ , quindi lunghezza della pala  $75\text{ m}$*
- *Velocità di rotazione  $V = 11\text{ giri/min.}$*
- *Altezza TIP =  $198\text{ m}$*

### 1.2 Forze agenti sulla traiettoria pala

La determinazione delle forze e dei momenti agenti sulla pala a causa di una rottura istantanea, durante il moto rotatorio, è molto complessa. La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate inerziali agenti sulla pala. Queste includono anche, per esempio, oltre all'impulso

Progetto Definitivo di un parco eolico composto da n.10 aerogeneratori da 4MW per una potenza complessiva pari a 40 MW, da ubicarsi in agro del comune di Banzi (PZ) in località "Piano Madama Giulia", delle opere connesse e delle infrastrutture indispensabili ricadenti nei comuni di Banzi (PZ) e Genzano di Lucania (PZ).

anche i momenti di *flapwise*, *edgewise* e *pitchwise* agenti al momento del distacco. La pala, quindi, quando inizierà il suo moto continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto). L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità. La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano.

La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco iniziale. Le forze inerziali sono modellate considerando un flusso *irrotazionale e stazionario*.

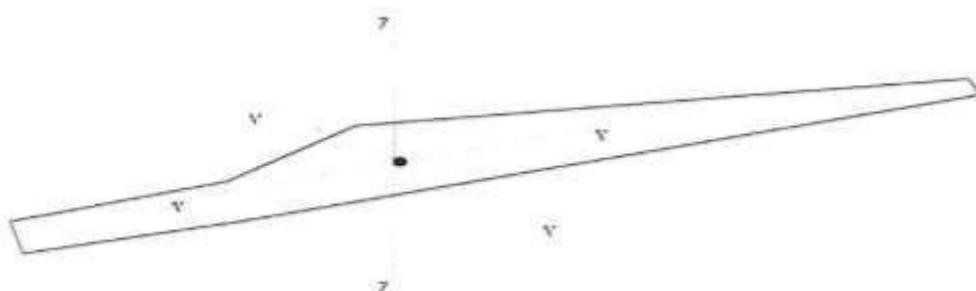


Figura 1 – Sistema coordinate (YY -- Flapwise, XX - Pitchwise, ZZ - Edgewise)

### 1.3 Esperienze e note statistiche

E' necessario enfatizzare che 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. In accordo a tale norma le pale degli aerogeneratori sono considerate "fail safe".

Questo paragrafo è stato redatto al fine di presentare alcuni degli elementi fondamentali per poter valutare la reale possibilità del distacco di una pala, o di frammenti di questa, dagli aerogeneratori.

L'esperienza pratica ha mostrato che in caso di distacco di pala o parti di essa il moto è stato di tipo "rotazionale complesso" e le distanze raggiunte sono normalmente risultate inferiori a quelle stimate con i calcoli semplificati qui riportati.

Frammenti di pala, solitamente di piccole dimensioni, per la maggior parte staccatisi a causa di azioni esterne (tipica la fulminazione atmosferica) o imperizia umana, sono stati ritrovati a non più di 40-50 m dalla base dell'aerogeneratore.

Tralasciando gli incidenti dovuti a cause eccezionali (uragani, tifoni), nei successivi paragrafi vengono descritti alcuni eventi e la valutazione tecnica alla base dell'analisi dei rischi sviluppata per eliminare la possibilità di reiterazione dell'incidente

#### 1.3.1 Distacco di una delle pale dal rotore

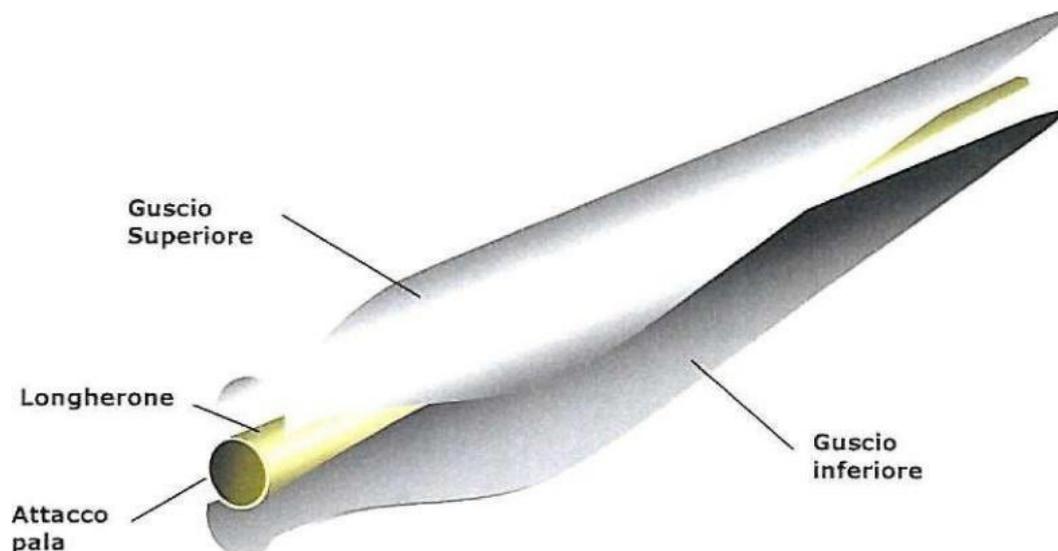
Questo tipo di incidente, che comporta il distacco di una pala completa dal rotore dell'aerogeneratore,

Progetto Definitivo di un parco eolico composto da n.10 aerogeneratori da 4MW per una potenza complessiva pari a 40 MW, da ubicarsi in agro del comune di Banzi (PZ) in località "Piano Madama Giulia", delle opere connesse e delle infrastrutture indispensabili ricadenti nei comuni di Banzi (PZ) e Genzano di Lucania (PZ).

può essere determinato della rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo.

In occasione di tali tipi di evento, la pala ha raggiunto il terreno ad una distanza inferiore ai cento metri.

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente compiti di forma. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.



*Figura 2 – Componenti di una pala*

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

L'evento si è manifestato a causa di incorretti interventi di manutenzione programmata cui l'aerogeneratore va sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore. Per cui l'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono aver determinato la rottura per fatica dei prigionieri ed al distacco della pala.

Progetto Definitivo di un parco eolico composto da n.10 aerogeneratori da 4MW per una potenza complessiva pari a 40 MW, da ubicarsi in agro del comune di Banzi (PZ) in località "Piano Madama Giulia", delle opere connesse e delle infrastrutture indispensabili ricadenti nei comuni di Banzi (PZ) e Genzano di Lucania (PZ).



*Figura 3 – Componenti del rotore*

### *1.3.2 Rottura (apertura) dell'estremità di pala*

Questo tipo di incidente si è quasi sempre manifestato in concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica. Tutte le pale prodotte sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine costituito da recettori metallici posti all'estremità di pala e lungo l'apertura della pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale.

In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala. È possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala.



*Figura 4 - Turbina danneggiata da fulminazione atmosferica.*

## 2. LEGGE DEL MOTO

Supponiamo di trovarci nel caso notevole di un proiettile non puntiforme. Le equazioni che governano il moto sono rispettivamente la prima e la seconda equazione della dinamica:

$$1) \quad M\mathbf{g} = M\mathbf{a}_G$$

$$2) \quad 0 = I \, d\omega / dt$$

Supponendo di concentrare tutto il peso nel centro di massa della pala, il momento della forza peso è nullo, avendo scelto G come polo per il calcolo dei momenti.

Pertanto la seconda equazione ci dice che il corpo durante la traiettoria che percorre, si mette a girare indisturbato intorno al suo asse principale di inerzia.

La soluzione al problema ci viene allora dalla risoluzione della prima equazione. Questa ci evidenzia che la pala si muoverà con il moto di un proiettile puntiforme, pertanto ne compirà il caratteristico moto parabolico.

Per studiare la gittata di un proiettile che si muove con moto parabolico (cioè sotto l'azione della sola forza peso e trascurando l'attrito con l'aria) si è utilizzato un sistema di riferimento cartesiano xy in cui l'origine O degli assi del sistema, coincide con il punto da cui il proiettile è stato lanciato.

Si è considerato il moto bidimensionale di un proiettile, come il moto di un punto materiale, tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento.

Scegliamo un sistema di riferimento con l'asse delle y positivo verso l'alto, in modo che l'origine degli assi sia nel punto  $(x_0, y_0) = (0,0)$  di partenza del proiettile; le componenti dell'accelerazione saranno  $a_x = 0$ ,  $a_y = -g$ . Dove  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  è l'accelerazione di gravità.

Utilizzando la legge di caduta di un grave, ricaveremo la traiettoria di un proiettile, verificando che è una parabola e mostrandone poi alcune caratteristiche.

Il vettore velocità  $v$  nell'istante iniziale  $t = 0$  ha modulo  $v_0$  ed è inclinato di un certo angolo  $\theta$  rispetto alla

direzione positiva dell'asse delle x; le sue componenti sono:

$$v_{0x} = v_0 \cos\theta$$

$$v_{0y} = v_0 \sin\theta$$

La legge della cinematica che esprime la velocità in funzione del tempo t è ( $v(t) = v_0 + at$ ).

Poiché non esistendo componenti orizzontali dell'accelerazione, la componente orizzontale della velocità  $v_x$  rimane costante, la componente verticale  $v_y$  cambia nel tempo perché esiste un'accelerazione costante diretta verso il basso ( $a_y = -g$ ):

$$v_x = v_{0x}$$

$$v_y = v_{0y} - gt$$

La legge del moto soluzione delle equazioni indicate in precedenza sono:

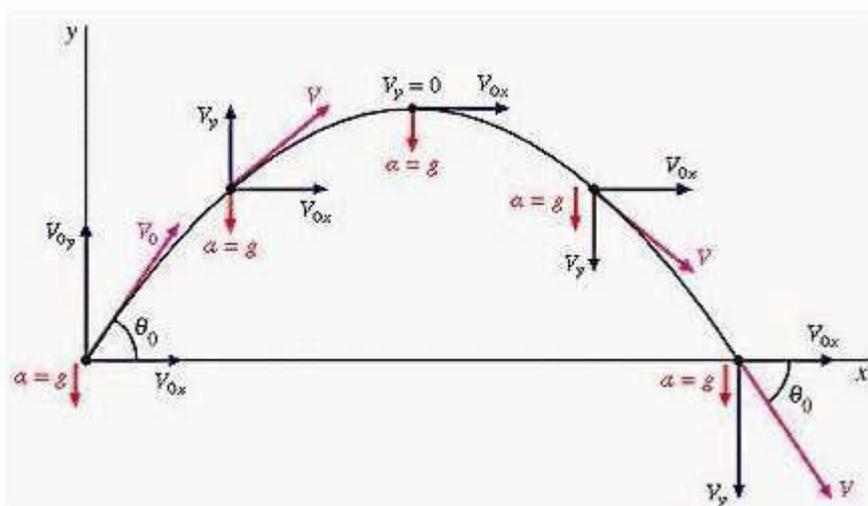
$$x(t) = x_0 + v_{0x}t$$

$$y(t) = y_0 + v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$$

Dove  $(x_0, y_0)$  è la posizione iniziale del punto materiale e  $(v_x, v_y)$  è la sua velocità. La traiettoria del puntomateriale intercetta il suolo al tempo T tale che  $y(T) = 0$ . Dalla legge del moto si ottiene:

$$T = \frac{v_{0y} + \sqrt{v_{0y}^2 + 2y_0g}}{g}$$

che come si vede è una parabola rivolta verso il basso passante per l'origine degli assi. Una rappresentazione del moto con disegnate le componenti della velocità è mostrato nella figura sottostante.



Dove è stata scarta la soluzione corrispondente a tempi negativi

La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo  $\alpha$  e dalla velocità tangenziale V della pala al momento del distacco. Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:  $x_0 = -R \cos(\alpha)$

$$y_0 = H + R \sin(\alpha)$$

$$v_x = V \sin(\alpha)$$

$$v_y = V \cos(\alpha)$$

La gittata G è la distanza dal palo del punto di impatto al suolo del frammento di pala. Dalla legge del moto otteniamo:

$$G = x(T)$$

Sostituendo l'espressione per T ricavata sopra, otteniamo la gittata G in termini di V e di  $\alpha$ :

$$G_{max} = \frac{V^2 \sin \alpha}{g} \left[ \cos \alpha + \left( \frac{2(H + R \sin \alpha)g}{V^2 \cos^2 \alpha} + 1 \right)^{1/2} \right] - R \cos \alpha$$

Si noti che, fissato un generico angolo  $\alpha$ , la gittata aumenta quadraticamente con V, salvo i casi particolari  $\alpha = \pm 90^\circ; 0^\circ; 180^\circ$ , nei quali la gittata aumenta linearmente con V oppure è pari ad R.

### 3. CALCOLO GITTATA DELLA PALA

Lo schema adottato per il calcolo è il seguente, avendo indicato con G il baricentro del sistema avremo:  $R_G$  = raggio del baricentro

$V_g$  = velocità periferica del baricentro



Prima di effettuare il calcolo della gittata, calcoliamo dei parametri che ci serviranno per il proseguo dello stesso.

#### 3.1 Calcolo del baricentro

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, possiamo ritenere con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, cioè:

<i>Tipo aerogeneratore</i>	<b>Baricentro <math>r_G</math></b>
<b>VESTAS V150 4MW HH=123m D=150m</b>	25

#### 3.2 Calcolo della velocità periferica.

Il dato di partenza è  $Rpm = 11$  giri/min che corrisponde ad una velocità angolare:

<i>Tipo aerogeneratore</i>	<b><math>\omega = 2\pi n/60</math></b>
<b>VESTAS V150 4MW HH=123m D=150m</b>	1,15133

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il punto G di raggio R percorre la circonferenza  $2\pi R$ ; dopo n giri al minuto lo spazio percorso sarà  $2\pi n$  metri/minuto. E questo sarà lo spazio percorso da tutti i punti situati sulla periferia del corpo in movimento circolare. Dunque la velocità periferica in metri al secondo di un corpo rotante (considerando la velocità massima del rotore pari a 15 giri al minuto), corrisponde a:

<i>Tipo aerogeneratore</i>	<b><math>V_G = \omega R_G (m/s)</math></b>
<b>VESTAS V150 4MW HH=123m D=150m</b>	28,783333

Tenendo conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza, il valore della velocità del baricentro risulta ridotta del 30% rispetto all'assenza di resistenze, per cui il valore reale è **20,15 m/s**.

### 3.3 Calcolo di hG

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, che si ritiene con buona approssimazione posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ossia  $R_g = 25$  m, essendo il raggio di ciascuna pala uguale a 75 m, viene valutato all'altezza dell'intera torre più il valore della proiezione di  $R_g$  sulla verticale ossia:

$$hg = H + (RG * \text{sen } \alpha)$$

Dove H è l'altezza della torre e il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, viene valutato per i diversi valori dell'angolo  $\alpha$ .

### 3.4 Calcolo della gittata della pala

Il calcolo della gittata è stato eseguito considerando diversi valori dell'angolo  $\alpha$ . Noto il valore di gittata massima, date le caratteristiche geometriche della pala, precedentemente valutate, si può calcolare il punto in cui cade il vertice della pala stessa.

Supponendo di prendere in considerazione l'ipotesi più pericolosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, si ottiene il punto più lontano di caduta pari al valore **massimo di gittata + i 2/3 della lunghezza della pala** come evidenziato nella tabella seguente:

Angolo	Gmax	Vertice pala
0	-25,0	<b>25,000</b>
5	-11,7	<b>38,252</b>
10	7,0	<b>56,979</b>
15	14,9	<b>64,897</b>
20	27,9	<b>77,867</b>
25	40,3	<b>90,338</b>
30	52,1	<b>102,133</b>
35	63,1	<b>113,095</b>
40	73,1	<b>123,095</b>
45	82,0	<b>132,029</b>
50	89,8	<b>139,822</b>
55	96,4	<b>146,427</b>
60	101,8	<b>151,826</b>
65	106,0	<b>156,024</b>
<b>70</b>	<b>109,1</b>	<b>159,053</b>
75	111,0	<b>131,110</b>
80	111,8	<b>161,816</b>
85	111,7	<b>161,696</b>
90	110,7	<b>160,688</b>
95	108,9	<b>158,884</b>
100	106,4	<b>156,377</b>
105	103,3	<b>153,258</b>
110	99,6	<b>119,763</b>
115	95,5	<b>145,529</b>
120	91,1	<b>141,074</b>
125	86,3	<b>136,316</b>
130	81,3	<b>131,313</b>
135	76,1	<b>126,114</b>
140	70,8	<b>120,760</b>

Progetto Definitivo di un parco eolico composto da n.10 aerogeneratori da 4MW per una potenza complessiva pari a 40 MW, da ubicarsi in agro del comune di Banzi (PZ) in località "Piano Madama Giulia", delle opere connesse e delle infrastrutture indispensabili ricadenti nei comuni di Banzi (PZ) e Genzano di Lucania (PZ).

145	65,3	<b>115,285</b>
150	59,7	<b>109,716</b>
155	54,1	<b>104,073</b>
160	48,4	<b>98,371</b>
165	42,6	<b>92,619</b>
170	36,8	<b>86,824</b>
175	31,0	<b>80,987</b>
180	25,1	<b>75,108</b>

Dalla tabella si evince che il valore massimo nelle condizioni più gravose si ottiene con un angolo didistacco pari agli 70° , ovvero:

<i>Tipo aerogeneratore</i>	<b>GITTATA MAX PALA + TERMINALE PALA</b>
<b>VESTAS V150 4MW HH=123m D=150m</b>	<b>159,053</b>

#### 4. CALCOLO GITTATA DEL FRAMMENTO DELLA PALA

Lo schema adottato per il calcolo della gittata nel caso di rottura del frammento di 5 m di una pala è simile a quello adottato per il distacco nel punto di attacco del mozzo, ovvero avendo indicato con G il baricentro del sistema avremo:

Rg = raggio del baricentro

Vg = velocità periferica del baricentro



Prima di effettuare il calcolo della gittata, calcoliamo dei parametri che ci serviranno per il proseguo dello stesso.

#### 4.1 Calcolo del baricentro

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, possiamo ritenere con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato secondo la seguente relazione:

$$R_g = D/2 - (2/3 * 5) \text{ (lunghezza del frammento)}$$

<i>Tipo aerogeneratore</i>	<b>Baricentro <math>r_G</math></b>
VESTAS V150 4MW HH=123m D=150m	71,66667

#### 4.2 Calcolo della velocità periferica.

Il dato di partenza è  $R_{pm} = 11$  giri/min che corrisponde ad una velocità angolare:

<i>Tipo aerogeneratore</i>	$\omega = 2\pi n/60$
VESTAS V150 4MW HH=123m D=150m	1,15133

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il punto G di raggio R percorre la circonferenza  $2\pi R$ ; dopo n giri al minuto lo spazio percorso sarà  $2\pi n R$  metri/minuto. E questo sarà lo spazio percorso da tutti i punti situati sulla periferia del corpo in movimento circolare. Dunque la velocità periferica in metri al secondo di un corpo rotante, corrisponde a:

<i>Tipo aerogeneratore</i>	$V_G = \omega R_G (m/s)$
<b>VESTAS V150 4MW HH=123m D=150m</b>	82,5122222

Tenendo conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza, il valore della velocità del baricentro risultaridotta del 30% rispetto all'assenza di resistenze, per cui il valore reale è **57,76 m/s**.

#### 4.3 Calcolo di hG

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, che si ritiene con buona approssimazione posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ossia  $R_g = 71,66667$  m, essendo il raggio di ciascuna pala uguale a 75 m, viene valutato all'altezza dell'intera torre più il valore della proiezione di  $R_g$  sulla verticale ossia:

$$hg = H + (R_G * \text{sen } \alpha)$$

Dove H è l'altezza della torre e il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, viene valutato per i diversi valori dell'angolo  $\alpha$ .

#### 4.4 Calcolo della gittata del frammento

Il calcolo della gittata è stato eseguito considerando diversi valori dell'angolo  $\alpha$ . Noto il valore di gittata massima, date le caratteristiche geometriche della pala, precedentemente valutate, si può calcolare il punto in cui cade il vertice della pala stessa.

Supponendo di prendere in considerazione l'ipotesi più pericolosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, si ottiene il punto più lontano di caduta pari al valore **massimo di gittata + i 2/3 della lunghezza del frammento** come evidenziato nella tabella seguente:

Angolo	Gmax	Vertice pala
0	-71,7	<b>-68,33</b>
5	-2,7	<b>0,67</b>
10	102,2	<b>105,57</b>
15	132,6	<b>135,97</b>
20	195,7	<b>199,05</b>
25	253,8	<b>257,14</b>
30	305,7	<b>309,03</b>
35	350,4	<b>353,76</b>
40	387,3	<b>390,61</b>
45	415,8	<b>419,18</b>
50	436,0	<b>439,35</b>
<b>55</b>	<b>448,0</b>	<b>451,29</b>
60	452,1	<b>455,46</b>
65	449,2	<b>452,58</b>
70	440,2	<b>443,53</b>
75	426,0	<b>429,38</b>
80	407,9	<b>411,24</b>
85	386,9	<b>390,23</b>
90	364,1	<b>367,41</b>
95	340,4	<b>343,71</b>
100	316,6	<b>319,90</b>
105	293,2	<b>296,57</b>
110	270,8	<b>328,55</b>

Progetto Definitivo di un parco eolico composto da n.10 aerogeneratori da 4MW per una potenza con pari a 40 MW, da ubicarsi in agro del comune di Banzi (PZ) in località "Piano Madama Giulia", del connesse e delle infrastrutture indispensabili ricadenti nei comuni di Banzi (PZ) e Genzano di Lucania (PZ)

115	249,5	252,85
120	229,5	232,86
125	210,9	214,21
130	193,5	196,88
130	193,5	193,55
135	177,5	180,79
140	162,5	165,85
145	148,6	151,96
150	135,7	138,99
155	123,5	126,86
160	112,1	115,45
165	101,3	104,67
170	91,1	94,41
175	81,3	84,61
180	71,8	75,17

Dalla tabella si evince che il valore massimo nelle condizioni più gravose si ottiene con un angolo didistacco pari agli 55° , ovvero:

<i>Tipo aerogeneratore</i>	<b>GITTATA MAX FRAMMENTO + TERMINALE FRAMMENTO</b>
VESTAS V150 4MW HH=123m D=150m	<b>451,29</b>

Sulla base delle operazioni di calcolo della gittata massima, sia della pala intera che del suo frammento pari a 5 mt, è emerso che i valori massimi di gittata si hanno per l'aerogeneratore proposto SONO:

<b>GITTATA MAX PALA + TERMINALE PALA</b>	<b>159,053 mt</b>
<b>GITTATA MAX FRAMMENTO + TERMINALE FRAMMENTO</b>	<b>451,29 mt</b>

assumendo il valore di maggior rischio pari a 1 nella direzione perpendicolare a quella del ventoprevalente.

## 5. CALCOLO DELLA RIDUZIONE GITTATA PER RESISTENZA DELL'ARIA

La riduzione della gittata massima dovuta alla resistenza dell'area, ovvero la giustificazione della riduzione operata in sede di relazione di calcolo della gittata massima della pala e del suo frammento degli ultimi 5 metri, è stata calcolando attraverso il confronto delle forze agenti sulla pala ossia tra la forza centrifuga (+) che tende a staccare la pala e la forza di attrito dell'area che tende a frenare la pala in caso didistacco.

Quindi avremo da una parte il valore della forza centrifuga calcolata con la formula:

$$F_{cf} = m \left( \frac{v^2}{r} \right) = m \frac{v^2}{r}$$

$F_{cf}$  = Forza centrifuga

$m$  = massa

$v$  = velocità di rotazione periferica

$r$  = raggio.

e dall'altra parte il valore della forza di attrito calcolata con la seguente formula:

$$D = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times S \times C_d$$

**D** = resistenza aerodinamica (dall'inglese Drag) (dimensionalmente una forza)

**C<sub>d</sub>** = coefficiente di resistenza aerodinamica

**ρ** = è la densità del fluido

**S** = superficie di riferimento

**V** = velocità del corpo rispetto al fluido indisturbato

### 5.1 Calcolo della forza centrifuga

Considerando il peso proprio di una singola pala dell'aerogeneratore da installare nel comune di Banzi, in particolare dell'aerogeneratore VESTAS V150 avente una lunghezza della pala pari a **75 mt** ed un peso pari a **25 t** (peso approssimato dell'elemento in vetroresina).

Dalla relazione di calcolo della gittata emerge che la velocità di rotazione periferica del frammento di pala (condizione di massima gittata) è pari a 71,67 m/s e considerando che la il peso è pari a  $P = m \times g$  (gravità) avremo una massa pari a:

$$25000 \text{ kg} = m \times 9,8 \text{ (valore accelerazione della gravità g) ovvero } 25000/9,8 = 2551,02 \text{ kg (massa della pala)}$$

Schematizzando e senza considerare a favore di sicurezza il rastremamento della pala, eseguendo la proporzione lineare comparata tra l'intero elemento ed il suo frammento finale della lunghezza (5 m) avremo un valore di massa pari a:

$$2551,02:75 = x: 5 \text{ ovvero } x = 2551,02 \times 5 / 75 = 170,068 \text{ kg (massa del frammento)}$$

Calcolando la forza centrifuga si avrà:

$$F_{cf} = 170,068 \times (71,67)^2 / 75 = 11.647,60 \text{ kgm/s}^2$$

### 5.2 Calcolo della resistenza aerodinamica

Per il calcolo della resistenza aerodinamica si è volutamente preso in considerazione il caso più cautelativo che semplifica il moto del frammento di pala alla stregua dell'ala di un aereo orientata in modo da esporre la superficie minima all'effetto resistente del mezzo. La figura che segue indica in modo tabellare il variare del coefficiente  $C_d$  in funzione della forma del corpo. Nel nostro caso si è considerato  $C_d=0,04$  del "corpo affusolato"

Forma	Coefficiente di resistenza
Sfera	0.47
Semi-sfera	0.42
Cono	0.50
Cubo	1.05
Cubo inclinato	0.80
Cilindro lungo	0.82
Cilindro corto	1.15
Corpo affusolato	0.04
Semi-corpo affusolato	0.09

Misure di coefficienti di resistenza

[https://it.wikipedia.org/wiki/Coefficiente\\_di\\_resistenza\\_aerodinamica](https://it.wikipedia.org/wiki/Coefficiente_di_resistenza_aerodinamica)

il valore del fluido che nel caso specifico è quello dell'aria che ad una temperatura media di 10° è pari a **1,247 (Densità in kg/m<sup>3</sup> (a 1 atm))** e la superficie del frammento della pala negli ultimi 5 mt che risulta proporzionalmente pari a **40 mq circa** avremo il seguente valore della resistenza dell'aria:

$$D = 0,5 \times 1,247 \times 71,67^2 \times 40 \times 0,04 = 5.124,26 \text{ kgm/s}^2$$

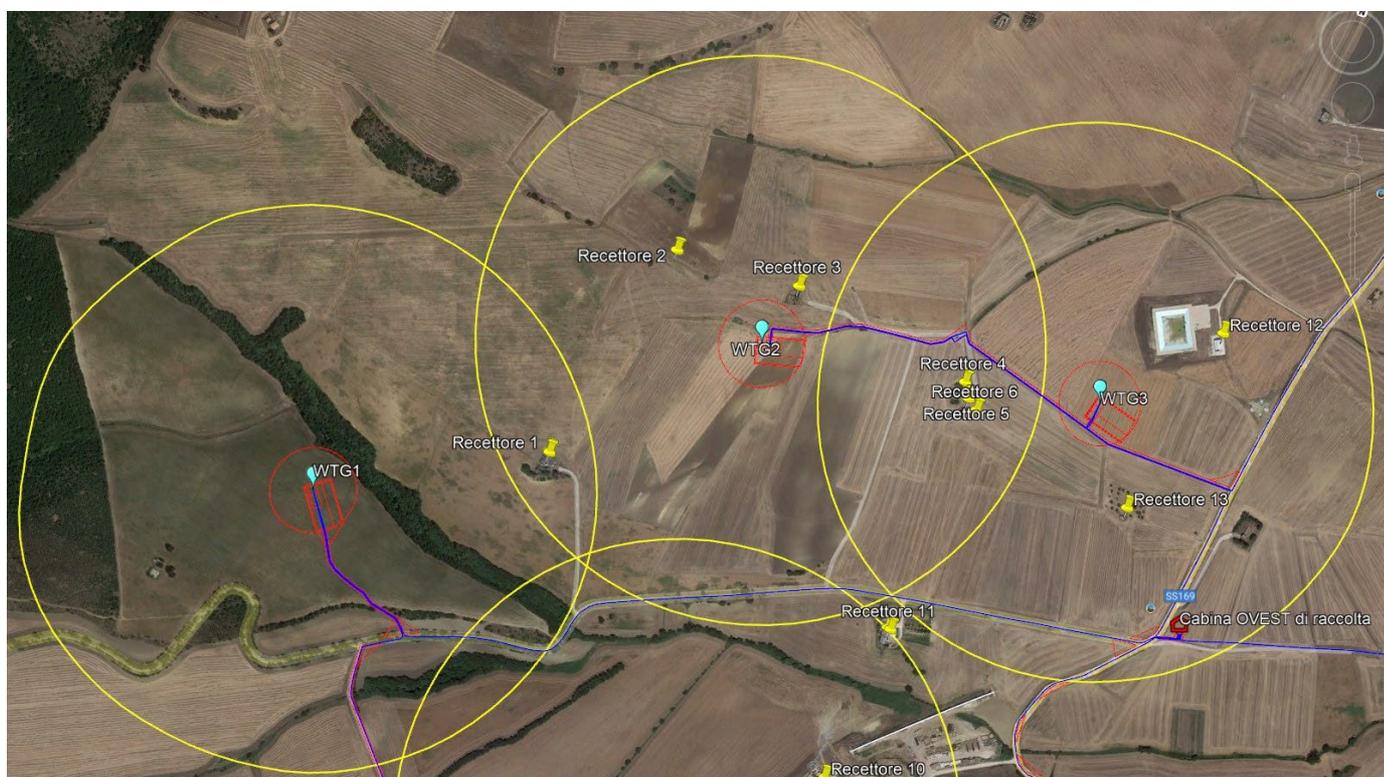
### 5.3 Risultati

Confrontando i valori con cui la forza di resistenza dell'aria (**5.124,26 kgm/s<sup>2</sup>**) si oppone alla forza centrifuga (**11.647,60 kgm/s<sup>2</sup>**) si evince che l'incidenza di forza oppositiva incide del **45%** sulla forza centrifuga tendente a ridurne l'effetto, possiamo ritenere che la

riduzione del **30%** applicata nei risultati di calcolo della gittata massima della relativa relazione, sia congruente considerando anche un maggior margine di sicurezza.

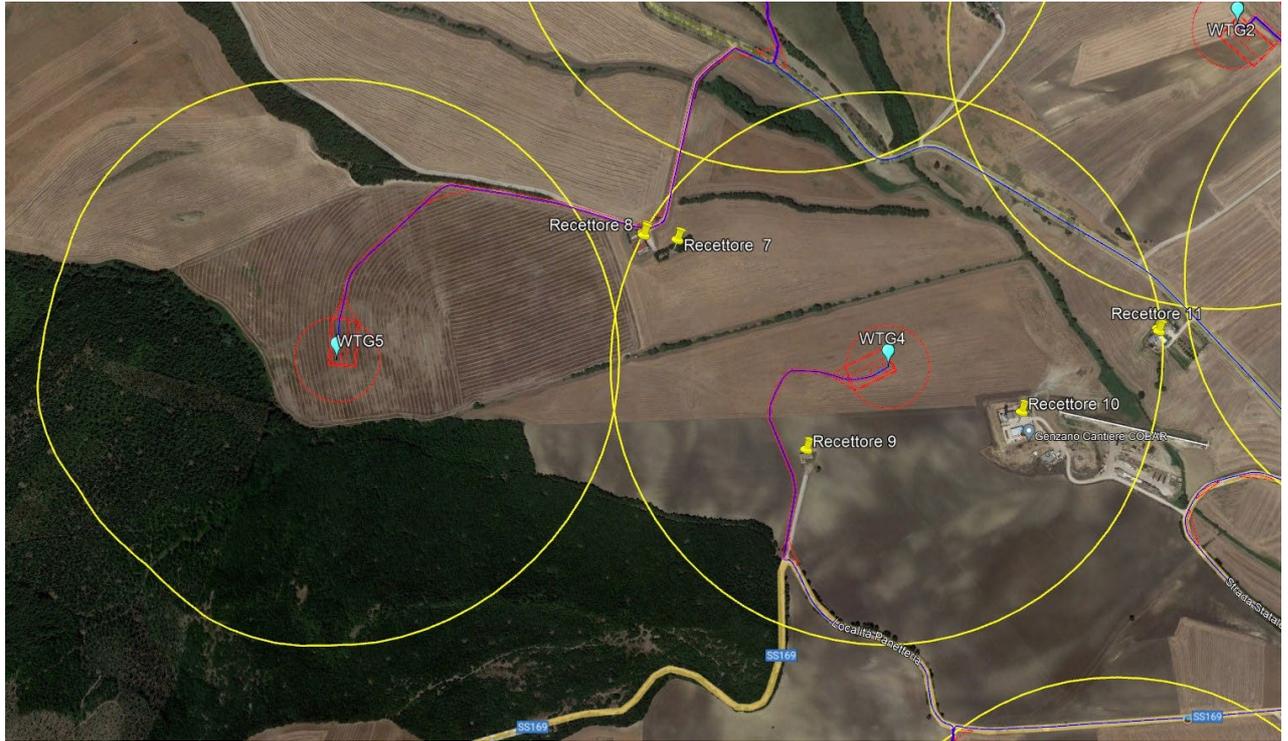
## 6. ANALISI E SCELTA DEI RICETTORI SENSIBILI PRESENTI NELL'AREA DI IMPIANTO

### 6.1 Fabbricati

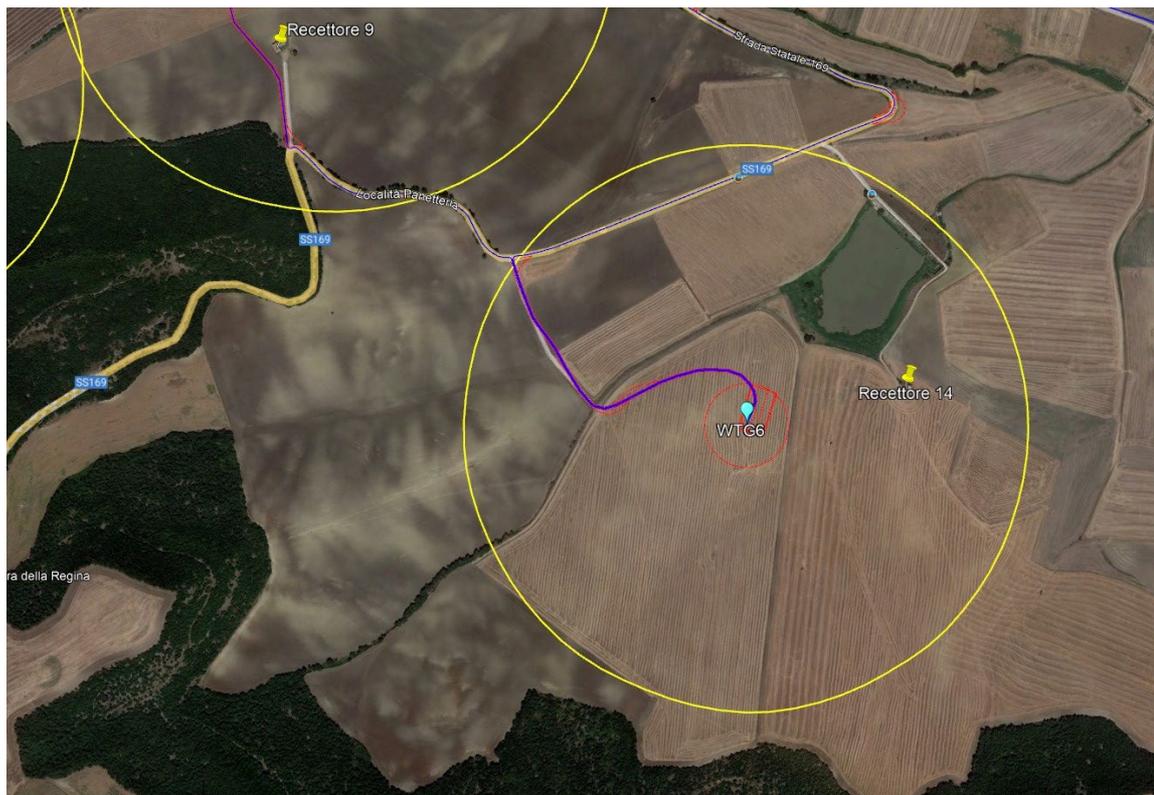


*Figura 5 – Individuazione planimetrica dei ricettori*

Progetto Definitivo di un parco eolico composto da n.10 aerogeneratori da 4MW per una potenza con pari a 40 MW, da ubicarsi in agro del comune di Banzi (PZ) in località "Piano Madama Giulia", del connesse e delle infrastrutture indispensabili ricadenti nei comuni di Banzi (PZ) e Genzano di Lucania (PZ)



*Figura 6 – Individuazione planimetrica dei ricettori 2*

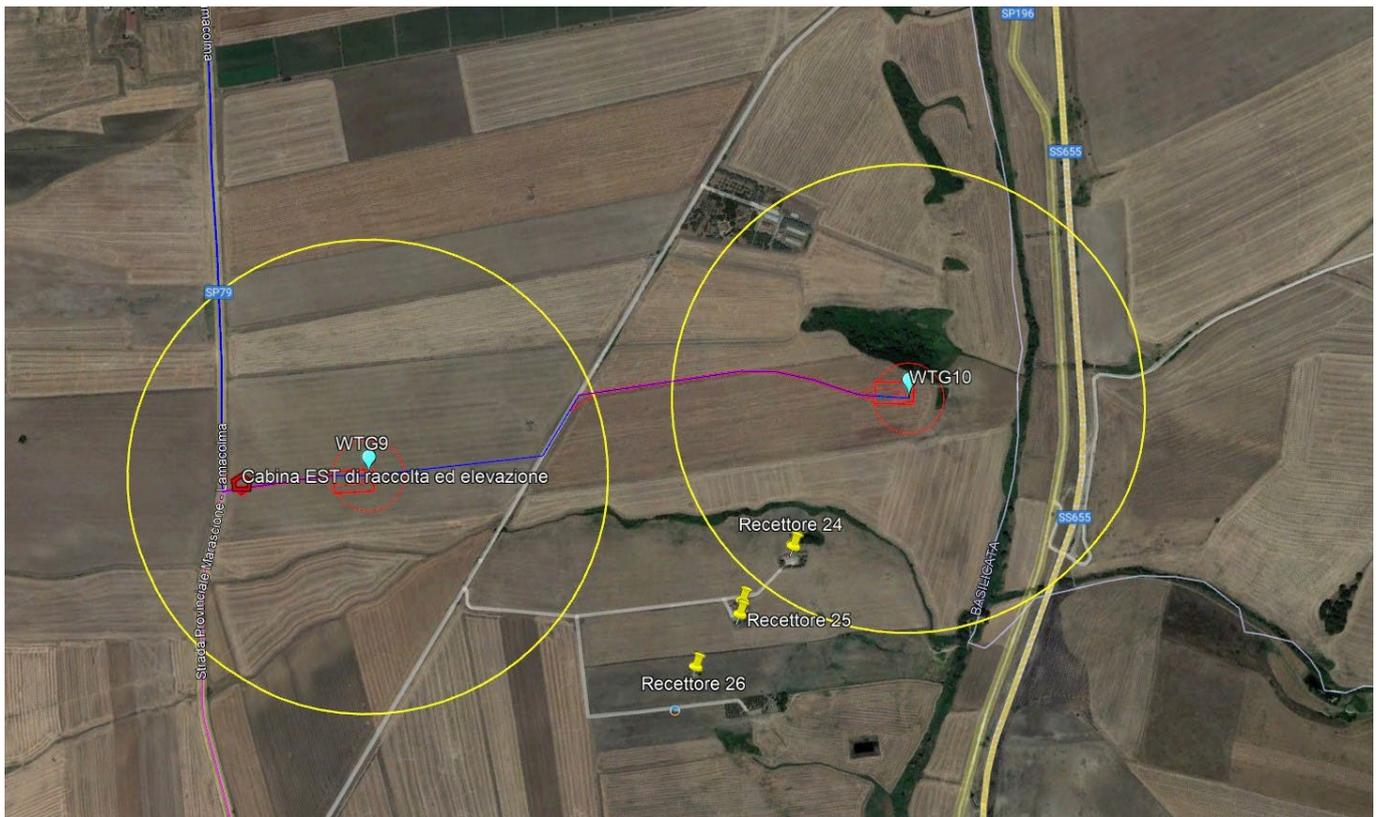


*Figura 7 – Individuazione planimetrica dei ricettori 3*

Progetto Definitivo di un parco eolico composto da n.10 aerogeneratori da 4MW per una potenza con pari a 40 MW, da ubicarsi in agro del comune di Banzi (PZ) in località "Piano Madama Giulia", del connesse e delle infrastrutture indispensabili ricadenti nei comuni di Banzi (PZ) e Genzano di Lucania (PZ)



*Figura 8– Individuazione planimetrica dei ricettori 4*



*Figura 9: Individuazione planimetrica dei ricettori 5*

L'individuazione e la scelta dei fabbricati da considerare come ricettori sensibili nella verifica dell'impatto in caso di rottura accidentale della pala e/o frammenti di essa, è stata effettuata attraverso le stesse considerazioni riportate nell'ambito dello studio acustico allegato. Tale analisi è stata estesa ai potenziali recettori distanti fino a 500 metri dagli aerogeneratori di progetto.

Da tale studio si è evinto che parte dei fabbricati individuati sono risultati magazzini, ciò perché l'area di impianto è sede di attività rurale, caratterizzata solo da saltuaria presenza della popolazione. Esistono fabbricati adibiti ad usi abitativo che sono sempre parte di complessi rustici in cui si opera attività di produzione agricola.

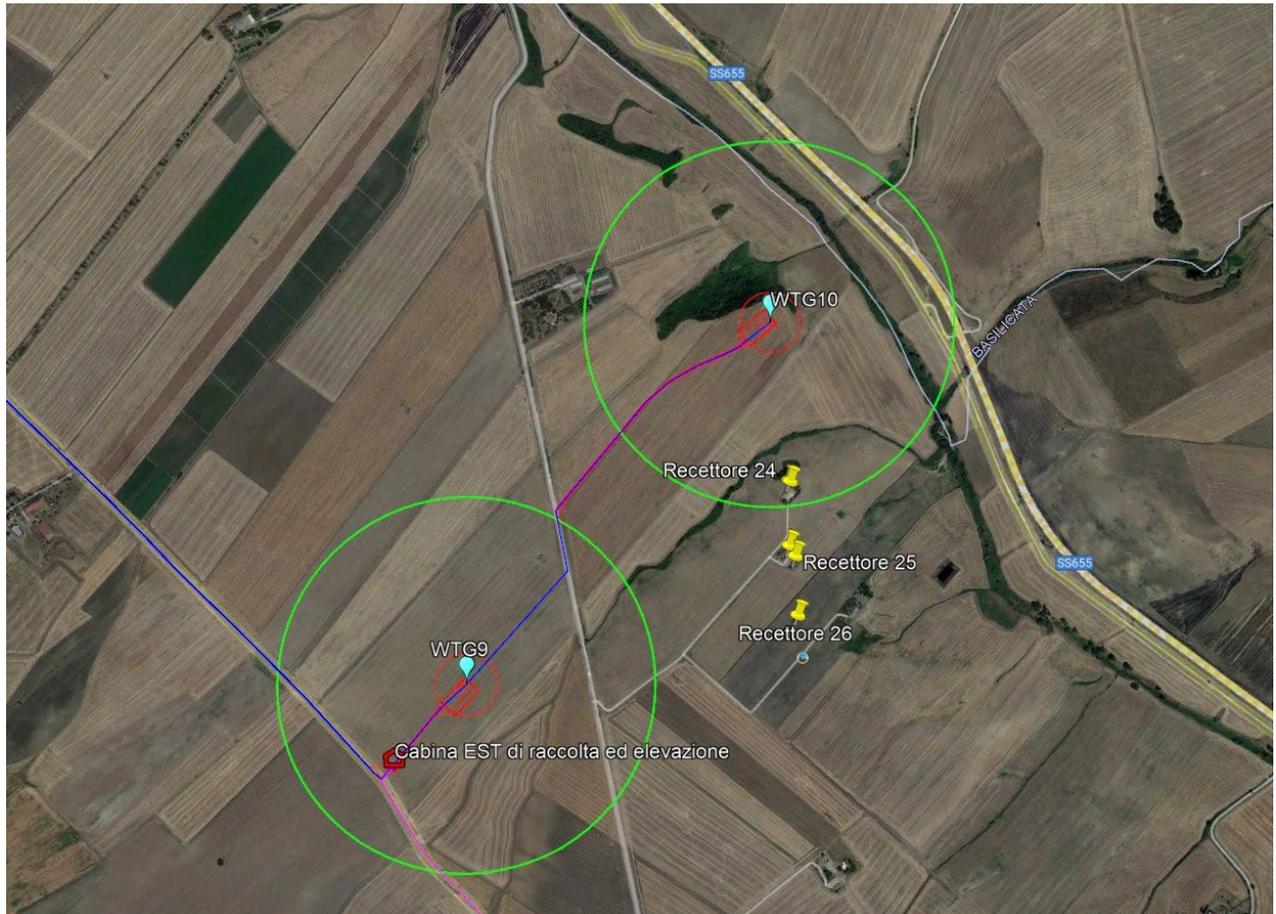
I criteri per la definizione delle caratteristiche che debbano avere i fabbricati per essere considerati recettori e la distanza minima che si deve rispettare per essi sono riportati nelle recenti linee guida nazionali per l'autorizzazione alla costruzione e all'esercizio di impianti di produzione di elettricità da fonti rinnovabili (pubblicate nella G.U. del 18/09/2010).

	COMUNE	FOGLIO	PARTICELLA	TIPOLOGIA
<b>RECETTORE 1</b>	BANZI	11	72	A03 + C06
RECETTORE 2	BANZI	11	3	PASCOLO
RECETTORE 3	BANZI	12	16	FABB DIRUTO
			17	FABB DIRUTO
			18	FABB DIRUTO
			121	F02
			87	FABB DIRUTO
RECETTORE 4	BANZI	12	122	C02 - F03
RECETTORE 5	BANZI	12	52	FABB DIRUTO
			59	FABB DIRUTO
			60	FABB DIRUTO
			61	FABB DIRUTO
RECETTORE 6	BANZI	12	65	SEMINATIVO
RECETTORE 7	BANZI	17	64	F02
<b>RECETTORE 8</b>	BANZI	17	59	A02 - D10
RECETTORE 9	BANZI	17	60	C02
RECETTORE 10	BANZI	17	75	E09 - E09
<b>RECETTORE 11</b>	BANZI	12	120	A03 - D10
RECETTORE 12	BANZI	12	164	E09
RECETTORE 13	BANZI	12	117	C02
RECETTORE 14	BANZI	18	156	C02
RECETTORE 15	BANZI	13	292	C02
RECETTORE 16	BANZI	13	293	C02
<b>RECETTORE 17</b>	BANZI	13	313	A04 - D10
			314	A04 - C02 - C06
<b>RECETTORE 18</b>	BANZI	13	335	D10
			336	D10
<b>RECETTORE 19</b>	BANZI	13	337	D10
<b>RECETTORE 20</b>	BANZI	13	338	D10
			339	D10
RECETTORE 21	BANZI	8	115	D10
RECETTORE 22	BANZI	8	116	F02
RECETTORE 23	BANZI	8	102	C06
			127	C02
<b>RECETTORE 24</b>	GENZANO	18	279	A04 - D10
<b>RECETTORE 25</b>	GENZANO	18	290	A04 - D10
RECETTORE 26	GENZANO	18	264	F02

Tabella 1: Elenco dei ricettori presenti nel buffer di 500 m

## 6.2 Viabilità

L'analisi della presenza di strade classificate secondo le Linee Guida Nazionali (pubblicate nella G.U. del 18/09/2010) estesa ad un buffer corrispondente alla gittata massima del frammento che dalle analisi e calcoli precedenti risulta pari a 452,67 mt dall'aerogeneratore sono state individuate strade interessate dal fenomeno, in particolare la SS169, SP79 e la SS655.



*Figura 10: Viabilità interessata dal rischio di gittata nell'area dell'impianto 1*

Progetto Definitivo di un parco eolico composto da n.10 aerogeneratori da 4MW per una potenza con pari a 40 MW, da ubicarsi in agro del comune di Banzi (PZ) in località "Piano Madama Giulia", del connesse e delle infrastrutture indispensabili ricadenti nei comuni di Banzi (PZ) e Genzano di Lucania (PZ)

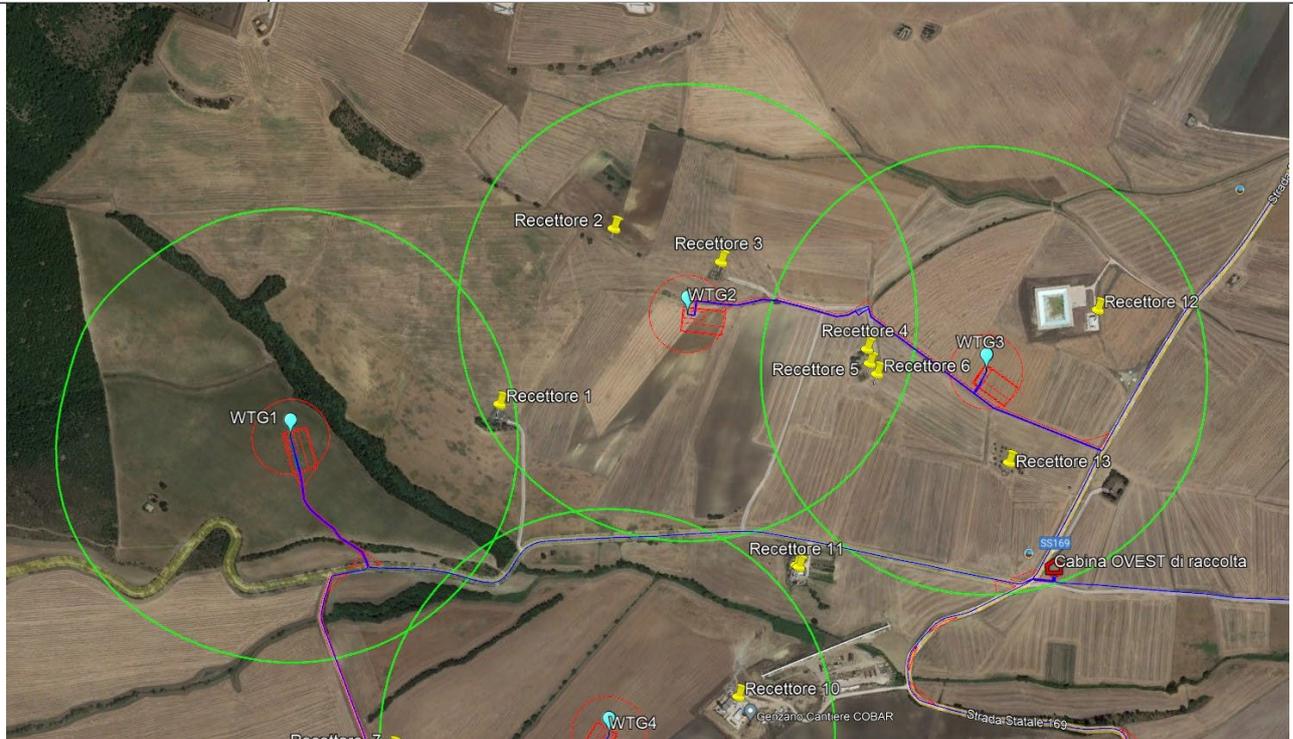


*Figura 11: Viabilità interessata dal rischio di gittata nell'area dell'impianto 2*



*Figura 12: Viabilità interessata dal rischio di gittata nell'area dell'impianto 3*

Progetto Definitivo di un parco eolico composto da n.10 aerogeneratori da 4MW per una potenza con pari a 40 MW, da ubicarsi in agro del comune di Banzi (PZ) in località "Piano Madama Giulia", del connesse e delle infrastrutture indispensabili ricadenti nei comuni di Banzi (PZ) e Genzano di Lucania (PZ)



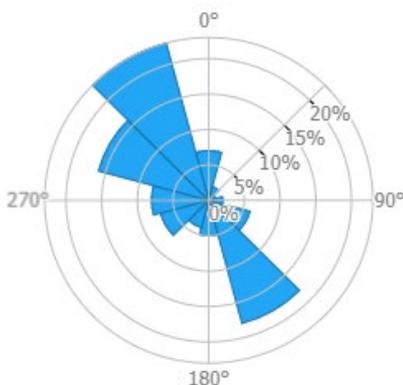
*Figura 13: Viabilità interessata dal rischio di gittata nell'area dell'impianto 4*



*Figura 14: Visuale verso l'impianto*

**7. ANALISI DEL FATTORE DI RISCHIO NELLA DIREZIONE PERPENDICOLARE AL VENTO PREVALENTE**

Dall’analisi degli studi anemologici si è ricavata la rosa dei venti (figura successiva)



*Figura 8: Rosa dei Venti*

Da cui si evince che la produzione massima si ottiene attraverso i venti provenienti dal quadrante ovest-nord. Assumendo tale direzione come massima probabilità di rischio si otterrà la direzione della gittata massima posta ortogonalmente alla direzione del vento e lungo il verso di rotazione dell’aerogeneratore. Nelle restanti direzioni del vento (SSW e NNW, WNW) – in particolare SSW -, poiché diminuisce la componente energetica della risorsa eolica, diminuisce proporzionalmente il fattore di rischio da considerare nel calcolo della gittata massima. Questo fa sì che nelle condizioni di vento meno probabile proveniente da ovest il valore massimo di gittata calcolata in direzione ortogonale (sud) si attesti sui 144,133 mt circa con un RPM pari a 9,31, quindi comunque meno rispetto alla distanza tra l’aerogeneratore e la strada statale che risulta pari a 275 mt. Con queste considerazioni si evince che il tratto di strada comunale risulta interessata da un rischio molto basso in relazione alla bassa probabilità di rischio correlato alla bassa frequenza del traffico presente lungo questa strada.

**8. VERIFICA DI IMPATTO DELLA GITTATA MASSIMA**

Sulla base del valore massimo della gittata nelle condizioni peggiori di rischio, **pari a 159,751 mt**, sono state condotte le seguenti verifiche di compatibilità dell’impianto rispetto ai ricettori sensibili, fabbricati e strade.

**8.1 Fabbricati**

Vi sono 7 fabbricati ad uso abitativo nel buffer dei 500 mt. Come definiti dalla Tabella 1 sono ampliamenti distanti dai valori di gittata analizzati.

Ricettore	Torre più prossima	Distanza m
A	1	418
B	5	576
C	4	493
D	8	522
E	8	487
F	10	422
G	10	574

## 8.2 Strade

Il controllo di compatibilità dell'impianto rispetto alle strade è stato effettuato ai sensi dell'art. 7.1 del DM 2010 verificando la rispondenza della distanza dell'aerogeneratore dalla viabilità primaria (Autostrade, Strade Statali e Provinciali). Si rappresenta che per tutti gli altri casi, la compatibilità dell'iniziativa con la viabilità secondaria, risulta sempre verificata: il calcolo della probabilità in condizioni di esigua frequentazione della sede viaria rende inapplicabile il metodo a causa dell'elevata trascurabilità del risultato derivante dall'involuppo di eventi altamente sporadici.

## 9. CONCLUSIONI

Dal confronto tra il potenziale rischio di rottura accidentale con lancio della pala (**max 159,053 mt**) e/o frammento di essa con la relativa distanza massima (**max 451,29 mt**) relativamente agli aerogeneratori proposti, si conclude quanto segue:

### 9.1 Fabbricati

**La verifica ha evidenziato l'assoluta compatibilità degli aerogeneratori col grado di antropizzazione dell'area.**

### 9.2 Strade

**Ai sensi dell'art. 7.1 DM 2010 la verifica di sicurezza in generale nel rispetto della distanza minima dalle strade ha evidenziato la piena compatibilità dell'iniziativa con il sistema viario dell'area evidenziando la rispondenza dei requisiti minimi anche nelle condizioni peggiori.**

Altamura, Ottobre 2023

Il tecnico

*Dott. Ing. Forgione Donato*

