



CITTA' METROPOLITANA  
DI CAMPOBASSO



REGIONE MOLISE



COMUNE di  
COLLETORTO



COMUNE di  
SAN GIULIANO

# PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO NEI COMUNI DI COLLETORTO E SAN GIULIANO DI PUGLIA, CON OPERE DI CONNESSIONE IN SANTA CROCE DI MAGLIANO E ROTELLO



Proponente	 <p><b>GRV Wind Molise 1 S.r.l.</b> via Durini, 9 - 20122 Milano info@grvalue.com</p>  				
Progettazione	 <p><i>Viale Michelangelo, 71</i> <b>80129 Napoli</b> <b>TEL.081 579 7998</b> <i>mail: tecnico.inse@gmail.com</i></p> <p><b>Amm. Francesco Di Maso</b> Ing. Nicola Galdiero Ing. Pasquale Esposito</p> <p>Collaboratori: Geol. V.E. Iervolino Dott. A. Ianniro Ing. V. Triunfo Ing. G. D'Abbrunzo Arch. C. Gaudiero Geom. F. Malafarina Arch. M. Mauro</p>				
Elaborato	<p>Nome Elaborato:</p> <h2 style="text-align: center;">RELAZIONE SULLO STUDIO DELLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI</h2>				
00	15-12-2021	PRIMA EMISSIONE	INSE Srl	INSE Srl	GRV Wind Molise 1 srl
Rev.	Data	Oggetto della revisione	Elaborazione	Verifica	Approvazione
Scala:	--				
Formato:	Codice Pratica <b>S239</b>		Codice Elaborato <b>AS239-SI10-R</b>		

<b>GRV Wind Molise 1 S.r.l.</b> 	<b>Relazione sullo studio della gittata degli elementi rotanti</b>	Cod. AS239-SI10-R	
		Data 15/12/2021	Rev. 00

## Sommario

1	PREMESSA.....	2
1.1	DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO.....	2
2	IPOTESI DI CALCOLO .....	4
2.1	Studio del moto del proiettile mediante le equazioni della cinematica .....	5
2.2	GITTATA MASSIMA .....	7
2.3	CALCOLO DELLA VELOCITA' PERIFERICA.....	8
2.4	CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA .....	9
2.5	ANALISI DEI RICETTORI .....	11
2.6	calcolo della gittata massima – distacco frammento di 10 m .....	12
2.7	Calcolo della gittata massima – distacco frammento 5 m.....	15
3	CONCLUSIONI .....	17

<b>GRV Wind Molise 1 S.r.l.</b> 	<b>Relazione sullo studio della gittata degli elementi rotanti</b>	Cod. AS239-SI10-R	
		Data 15/12/2021	Rev. 00

## 1 PREMESSA

La società GRV Molise 1 Srl, soggetta ad attività di direzione e coordinamento di GR Value (Green Resources Value) Spa, è proponente di un progetto di produzione di energia rinnovabile da fonte eolica ubicato nei Comuni di Colletorto e San Giuliano di Puglia, in provincia di Campobasso ed opere di connessione nel comune di Rotello (Cb).

L'ipotesi progettuale prevede l'installazione di n.7 aerogeneratori di potenza nominale di 6,2 MW per una potenza complessiva di impianto pari a 43,4 MW. Gli aerogeneratori saranno collegati tra loro attraverso cavidotto interrato in MT a 30kV che collegheranno il parco eolico alla stazione di trasformazione utente 30/150 kV localizzata alla p.lla 40 del F.30 del comune di Rotello (Cb); essa sarà collegata rigidamente alle sbarre 150kV della adiacente SE di condivisione; quest'ultima attraverso un cavo AT 150kV sarà collegata allo stallo condiviso 150kV interno alla SE Terna 150/380kV, localizzata nel Comune di Rotello (Cb), che rappresenta il punto di connessione dell'impianto alla RTN.

Il progetto è assoggettato a Valutazione di Impatto Ambientale di competenza Ministeriale (Ptot>30 MW).

La presente relazione si riferisce al calcolo della gittata massima in caso di rottura di una pala dell'aerogeneratore e di un frammento di pala di 10 e 5 m.

### 1.1 DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO

L'ambito territoriale considerato si trova nella porzione Centro Orientale della Regione Molise quasi a confine con il territorio Nord-Ovest della Regione Puglia. I comuni interessati dal progetto sono i Comuni di Colletorto (Cb) e San Giuliano di Puglia (Cb), con riferimento all'impianto eolico, e il Comune di Rotello (Cb) per quanto concerne la connessione alla RTN. L'impianto si localizza quindi sul confine tra i due Comuni di Colletorto e San Giuliano di Puglia.

L'area vasta, che è individuata su cartografia come l'inviluppo delle distanze dagli aerogeneratori di ampiezza pari a 50 Hmax, è ampia 10 km e comprende invece altri Comuni che sono interessati prevalentemente da impatti di tipo visivo (Carlantino, Sant'Elia a Pianisi, Bonefro, Montelongo, Santa Croce di Marigliano, Castelnuovo della Daunia, Casalnuovo Monterotaro, Casalvecchio di Puglia). Sono stati analizzati tutti gli aspetti programmatici, vincolistici ed ambientali presente nell'area vasta.

Il sito oggetto di intervento è ubicato, in località Liscione, ricadente nel Foglio IGM Serie M792 F.395 "San Paolo di Civitate" scala 1: 50.000 e si sviluppa tra quote che vanno dai 290 ai 540 metri s.l.m. La morfologia è prevalentemente collinare.

Le opere di connessione sono localizzate in Loc. Piana della Fontana nel Comune di Rotello (Cb).

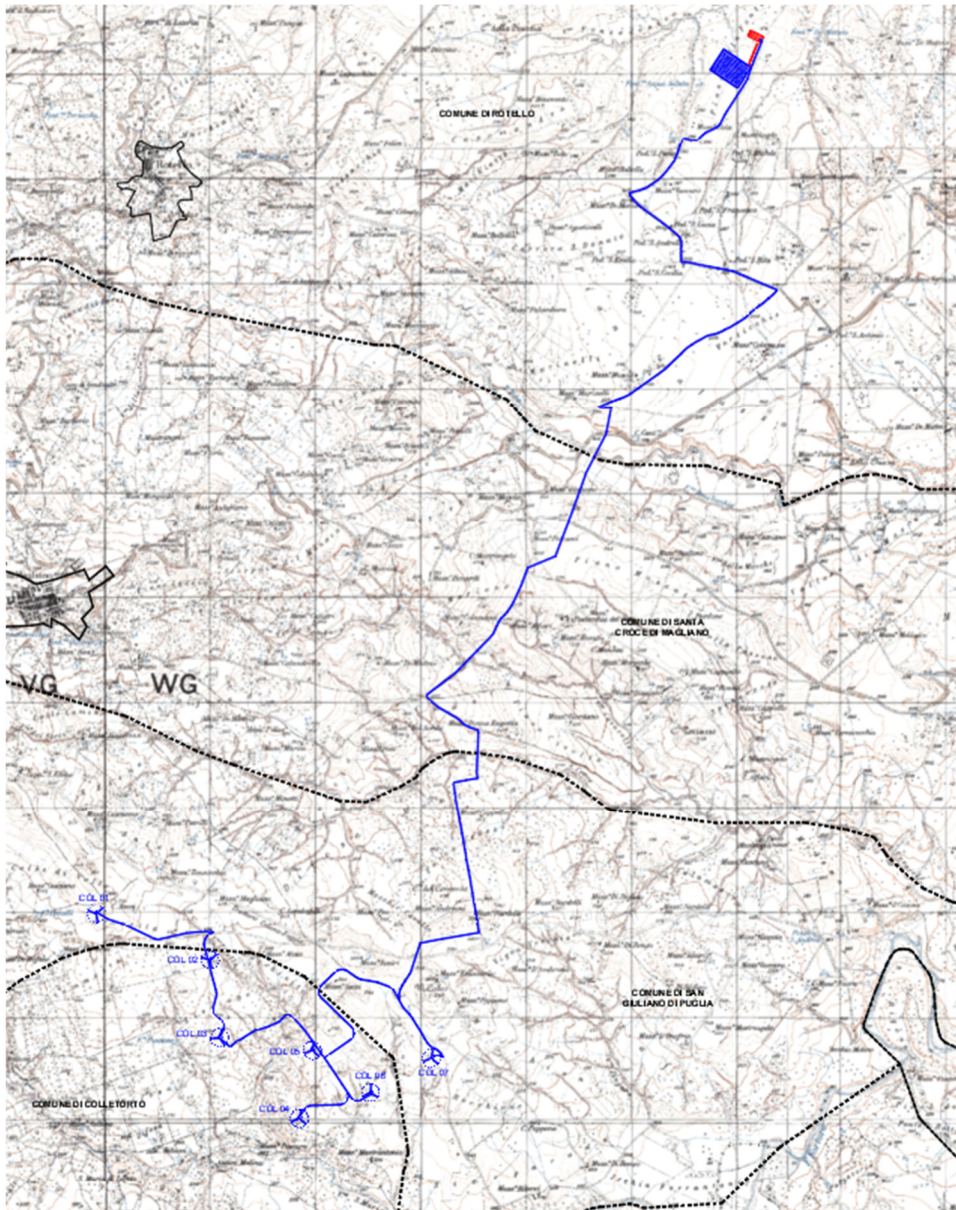


Figura 1: Inquadramento territoriale su IGM

In particolare, il progetto prevede l'installazione di N.7 aerogeneratori della potenza nominale di 6,2 MW localizzati alle seguenti coordinate:

N° Aerogeneratore	Coordinate UTM 33 WGS84	
	EST	NORD
COL 01	499841,81	4614788,09
COL 02	500925,89	4614345,37
COL 03	201017,12	4613606,82
COL 04	50177,10	4612840,75
COL 05	501899,28	4613486,47
COL 06	502453,78	4613087,52
COL 07	503033	4613412

Tabella 1: Coordinate degli aerogeneratori in sistema UTM 33 WGS 84 Fuso 33

L'aerogeneratore scelto in fase progettuale, per le valutazioni urbanistiche ed ambientali, è di produzione Siemens Gamesa SG 6.0 da 6,2 MW con rotore pari a 170 m di diametro e altezza mozzo pari a 115 m per una H totale pari a 200 m. In fase esecutiva potrà essere scelto un aerogeneratore di costruzione diversa ma con caratteristiche similari.

## 2 IPOTESI DI CALCOLO

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo della gittata massima per distacco dell'intera pala sono le più gravose possibili in modo da giungere a risultati sicuramente cautelativi.

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);
- 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 del mozzo  $H = 115$  m
- Diametro del rotore  $D = 170$  m
- Distanza del centro di massa dal mozzo  $= L_p/3 = 28,33$  m
- Velocità di rotazione  $V = 8,5$  giri/min.

<b>GRV Wind Molise 1 S.r.l.</b> 	<b>Relazione sullo studio della gittata degli elementi rotanti</b>	Cod. AS239-SI10-R	
		Data 15/12/2021	Rev. 00

La procedura seguita per il calcolo della gittata massima, in caso di rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore, prende in considerazione le condizioni al contorno più gravose, in maniera tale da aumentare il grado di sicurezza massimo.

Con lo studio del moto di un proiettile si intende fornire un modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati (o urtano ad esempio) con un angolo di alzo obliquo, con una velocità costante e che compiono un moto parabolico. Chiaramente la resistenza dell'aria non è assolutamente trascurabile.

Infatti, più il corpo è grande, più la resistenza dell'aria (o di un altro fluido) influisce sulle variabili del moto (gittata, altezza massima, tempo di caduta). Una caratteristica importante della resistenza aerodinamica dei fluidi è che essa dipende dalla velocità: più veloci sono gli oggetti, più grande è la resistenza dei fluidi nei quali si muovono: tale premessa è utile per ritenere trascurabili le forze ed il momento di resistenza dovute al mezzo in cui si svolge il moto (aria).

Il moto di un proiettile si può pensare come la composizione di due moti: uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale, e uno uniformemente accelerato (con accelerazione modulo  $g$ ) in direzione verticale. Ne segue che la traiettoria seguita da un corpo, se è denso e poco esteso, o altrimenti dal suo centro di massa, ha un andamento parabolico.

La gittata è la distanza tra il punto in cui viene lanciato un proiettile (con velocità iniziale inclinata verso l'alto rispetto all'orizzontale) e il punto in cui esso ritorna al suolo. È interessante osservare che all'aumentare dell'angolo a formato con il terreno, la gittata del proiettile aumenta, presentando valore massimo per un angolo pari a  $\pi/4$ ; ad ulteriori incrementi dell'angolo al valore della gittata torna a diminuire presentando un valore nullo allorquando il proiettile è lanciato verso l'alto con angolo pari a  $\pi$ .

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) utilizzeremo un sistema di riferimento cartesiano  $XY$  in cui l'origine  $O$  degli assi del sistema, coincida con il punto da cui il proiettile è stato lanciato.

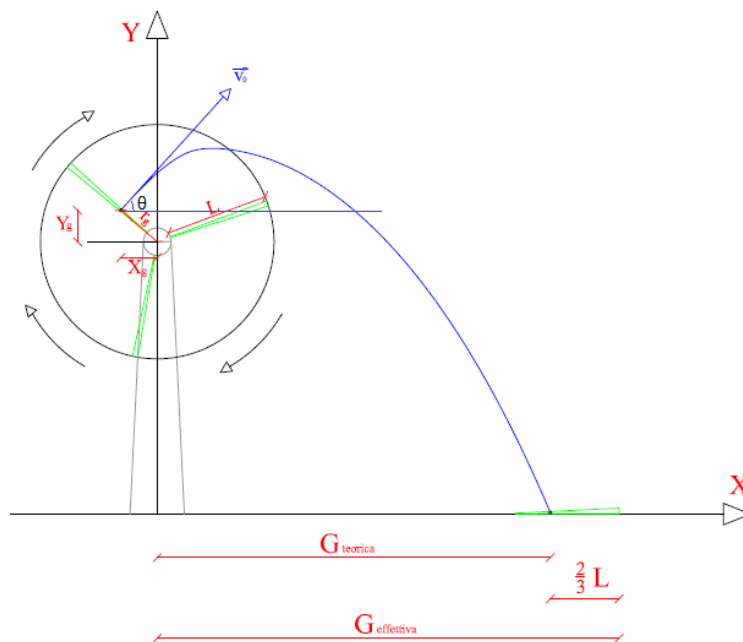
## 2.1 STUDIO DEL MOTO DEL PROIETTILE MEDIANTE LE EQUAZIONI DELLA CINEMATICA

Considereremo 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.

Sceghieremo un sistema di riferimento con l'origine degli assi O centrata nel punto di partenza del corpo ( $x_0$ ,  $y_0$ ), con l'asse delle Y positivo verso l'alto, e l'asse positivo delle X nello stesso verso del moto orizzontale del proiettile; le componenti dell'accelerazione saranno:

$$a_x = 0 \quad a_y = -g$$

Rappresenteremo la legge di caduta di un grave, ovvero di un punto materiale, lanciato nello spazio con velocità iniziale  $v_0$  e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di  $\theta$  come in figura:



Ricordando che:

$$a_x = 0 \quad a_y = g \text{ (dove } g = -9,81 \text{ m/sec}^2\text{)}$$

e considerando che:

Direzione x: il MOTO è RETTILINEO UNIFORME

Direzione y: il MOTO è UNIFORMEMENTE ACCELERATO

La velocità  $v_0$  ha componenti nelle due direzioni:

$$v_x = v_0 \cos$$

$$v = v_0 \sin$$

<b>GRV Wind Molise 1 S.r.l.</b> 	<b>Relazione sullo studio della gittata degli elementi rotanti</b>	Cod. AS239-SI10-R	
		Data 15/12/2021	Rev. 00

Da cui

$$v_x = v_{x0} \qquad x = x_0 + v_{x0}t$$

e

$$v_y = gt + v_{y0} \qquad y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

## 2.2 GITTATA MASSIMA

La gittata è la distanza percorsa dal proiettile in direzione  $x$  prima di toccare terra.

Questo valore si trova imponendo che nella equazione:

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

sia nullo  $y$  determinando così l'istante  $t$  in cui avviene il transito (e in questo caso l'impatto) alla quota  $y=0$  sarà:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0 = 0$$

Nell'ipotesi semplificativa che  $y_0 = 0$  si ottiene:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t = 0$$

da cui le due soluzioni:

$$t_0 = 0 \qquad t_1 = -\frac{2v_{y0}}{g} = -\frac{2v_0 \sin \theta}{g}$$

$t_0$  corrisponde all'istante di lancio del proiettile (abbiamo infatti ipotizzato per semplicità che  $y_0=0$ );

$t_1$  all'istante in cui il proiettile, avvenuto il lancio, tocca nuovamente terra. Sostituendo quest'ultimo valore nell'equazione  $x = x_0 + v_{x0}t$ , descrittiva del moto lungo  $x$ , si ricaverà il valore della gittata:

$$x = x_0 - 2\frac{v_0^2}{g} \sin \theta \cos \theta$$

Ipotizzando per semplicità che

$$x_0 = 0$$

ed essendo

$$2 \sin \theta \cos \theta = \sin 2\theta$$

si

può riscrivere la equazione per il calcolo della gittata come:



<b>GRV Wind Molise 1 S.r.l.</b> 	<b>Relazione sullo studio della gittata degli elementi rotanti</b>	Cod. AS239-SI10-R	
		Data 15/12/2021	Rev. 00

$$x = -\frac{v_0}{g} \sin 2\theta$$

La gittata massima è così funzione del modulo della velocità iniziale, della ascissa e della quota iniziale di lancio (che in questo caso semplificato sono state considerate nulle), e di  $\vartheta$  angolo di inclinazione della gittata: in particolare essa sarà massima quando  $\sin 2\vartheta = 1$  cioè  $2\vartheta = \pi/2$  ossia  $\vartheta = \pi/4$ .

Nel caso in questione  $y_0$  non sarà uguale a zero, ma corrispondente alla quota del baricentro G del sistema ipotizzato rispetto alla quota del piano di campagna.

### Determinazione del baricentro

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ossia  $r_g = 28,33 \text{ m}$  essendo la lunghezza di ciascuna pala uguale a  $85 \text{ m}$ .

Di conseguenza l'altezza di lancio sarà uguale a:

$$y_0 = H_{torre} + Y_g$$

Dove

$$(Y_g = r_g \cos \vartheta)$$

Ciò implica che la soluzione di  $t$  sarà:

$$t = \frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4\left(\frac{1}{2}gy_0\right)}}{g}$$

tale valore andrà sostituito nell'equazione descrittiva del moto lungo  $x$ , per trovare la gittata massima.

### **2.3 CALCOLO DELLA VELOCITA' PERIFERICA**

La velocità angolare media  $w$  è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo.

Chiamiamo con  $n$  il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare. Tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a  $2\pi$  radianti, per  $n$  giri avremo  $2\pi n$  radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare  $w$  al minuto del corpo in movimento.

Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ rad/sec}$$

<b>GRV Wind Molise 1 S.r.l.</b> 	<b>Relazione sullo studio della gittata degli elementi rotanti</b>	Cod. AS239-SI10-R	
		Data 15/12/2021	Rev. 00

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  $2\pi r n$  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 di 8,5 giri al minuto) corrisponde a:

$$V_g = \omega r_g = \frac{2\pi n}{60} r_g = 25,20 \text{ m/sec}$$

Se si vuol considerare l'effetto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza, il valore della velocità del baricentro risulterebbe, secondo studi empirici, ridotta del 30% rispetto all'assenza di resistenze, per cui il valore risulterebbe pari a 17,64 m/s.

#### 2.4 CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

Quindi, nell'ipotesi di distacco di una pala nel punto di serraggio del mozzo, punto di maggiore sollecitazione a causa del collegamento, vengono considerate le seguenti ipotesi:

- il moto del sistema è considerato di tipo rigido non vincolato;
- si ritengono trascurabili le forze di resistenza dell'aria;
- le componenti dell'accelerazione saranno  $a_x = 0$ ,  $a_y = -g$ .
- la velocità periferica  $v_0$  è uguale a 25.20 m/sec. (17,64 se si considera l'effetto attrito)
- Le coordinate del punto di partenza del corpo non saranno (0,0) coincidenti con l'origine degli assi ma  $(0, HG = H_{torre} + Y_g)$  ossia le coordinate del baricentro  $G$  di una pala.

La risoluzione dell'equazione descrittiva del moto, nelle suddette condizioni, sarà quindi:

$$\mathbf{G} = \frac{\mathbf{v}_{x0}(\mathbf{v}_{y0} + \sqrt{\mathbf{v}_{y0}^2 + 2 * \mathbf{g} * \mathbf{HG}})}{\mathbf{g}} - \mathbf{X}_g$$

Al valore di gittata andrà sottratta la distanza  $X_g$  del baricentro rispetto all'asse della torre ( $X_g = r_g \sin \vartheta$ ) e aggiunta la distanza del vertice della pala considerato nelle condizioni più gravose, ovvero disposto nella parte più lontana dal baricentro, ossia a  $L_g = 56,7 \text{ m}$ .

Nella tabella che segue si sono indicati i valori più rappresentativi della gittata massima e della distanza totale dalla torre nel punto di caduta rispetto a valori dell'angolo  $\vartheta$ .

$\theta$ (°)	$\theta$ (rad)	Vx	Vy	Hg	Gt	Xg	Lg	Ge
0	0,00	25,22	0,00	143,33	136,33	0,00	56,67	193,00
1	0,02	25,22	0,44	143,33	136,95	0,49	56,67	193,62
2	0,03	25,20	0,88	143,32	137,53	0,99	56,67	194,20
3	0,05	25,19	1,32	143,29	138,08	1,48	56,67	194,74
4	0,07	25,16	1,76	143,26	138,58	1,98	56,67	195,24
5	0,09	25,12	2,20	143,23	139,04	2,47	56,67	195,71
6	0,10	25,08	2,64	143,18	139,46	2,96	56,67	196,12
7	0,12	25,03	3,07	143,12	139,83	3,45	56,67	196,50
8	0,14	24,97	3,51	143,06	140,16	3,94	56,67	196,83
9	0,16	24,91	3,95	142,98	140,45	4,43	56,67	197,11
10	0,17	24,84	4,38	142,90	140,68	4,92	56,67	197,35
11	0,19	24,76	4,81	142,81	140,87	5,41	56,67	197,54
12	0,21	24,67	5,24	142,71	141,01	5,89	56,67	197,68
13	0,23	24,57	5,67	142,61	141,10	6,37	56,67	197,77
14	0,24	24,47	6,10	142,49	141,13	6,85	56,67	197,80
15	0,26	24,36	6,53	142,37	141,12	7,33	56,67	197,78
16	0,28	24,24	6,95	142,24	141,04	7,81	56,67	197,71
17	0,30	24,12	7,37	142,10	140,92	8,28	56,67	197,58
18	0,31	23,99	7,79	141,95	140,73	8,76	56,67	197,40
19	0,33	23,85	8,21	141,79	140,49	9,22	56,67	197,15
20	0,35	23,70	8,63	141,62	140,19	9,69	56,67	196,85
25	0,44	22,86	10,66	140,68	137,76	11,97	56,67	194,43
30	0,52	21,84	12,61	139,54	133,74	14,17	56,67	190,40
35	0,61	20,66	14,47	138,21	128,03	16,25	56,67	184,69
40	0,70	19,32	16,21	136,70	120,59	18,21	56,67	177,25
45	0,79	17,83	17,83	135,03	111,41	20,03	56,67	168,08
50	0,87	16,21	19,32	133,21	100,53	21,70	56,67	157,20
55	0,96	14,47	20,66	131,25	88,05	23,21	56,67	144,71
60	1,05	12,61	21,84	129,17	74,08	24,54	56,67	130,74
65	1,13	10,66	22,86	126,97	58,80	25,68	56,67	115,47
70	1,22	8,63	23,70	124,69	42,44	26,62	56,67	99,11
75	1,31	6,53	24,36	122,33	25,25	27,37	56,67	81,91
80	1,40	4,38	24,84	119,92	7,51	27,90	56,67	64,18
85	1,48	2,20	25,12	117,47	-10,46	28,23	56,67	46,21
90	1,57	0,00	25,22	115,00	-28,33	28,33	56,67	28,33

Tabella 1: Valori della gittata al variare dell'angolo di rotazione senza considerare l'effetto attrito

Dall'analisi della gittata si ottiene che la massima distanza percorsa dal baricentro dell'elemento si ottiene per un angolo  $\theta$  intorno a  $14^\circ$  con un valore di gittata pari a circa 141 metri circa.

Le ipotesi teoriche di calcolo determinano il valore ultimo espresso d, trascurando l'effetto aerodinamico che oltretutto indurrebbe nella pala un moto rototraslatorio combinato, derivante dall'azione centrifuga di espulsione, dall'avvolgimento sul proprio asse che si induce nella pala espulsa a causa del suo stesso profilo e dalla azione del vento ortogonale al piano che contiene la circonferenza di rotazione delle pale. Pertanto, il moto derivante andrebbe studiato nella sua evoluzione 3D anziché nel piano; tuttavia, la semplificazione introdotta dal modello 2D adottato è a vantaggio di sicurezza per quanto riguarda la gittata massima, non avendo considerato l'effetto dell'attrito viscoso dell'aria. Per conseguenza il valore definitivo determinato risulta: d= 197,80 m.

Questo valore in realtà dovrebbe essere inferiore per l'effetto attrito e resistenza nella rototraslazione.

Riportando uno studio della BP POWER nel "Blade throw calculation under normal operating" "esperienze basate su dati reali (su una casistica di 1578 casi) fino all'agosto del 2006 hanno dimostrato che nel caso di

distacco della pala o parti di essa, l'unico moto che si è registrato è stato un moto di completa rotazione e che le distanze percorse lungo il moto sono risultate sempre inferiori alle lunghezze riportate nella relazione. Il distacco delle parti, in genere piccole, dovuto a guasti causati da eventi eccezionali (quali la straordinaria energia prodotta da un fulmine) ha portato nel peggiore dei casi, a ritrovare le parti stesse a distanze non superiori ai 40-50 metri dalla base della torre”.

Sulla base delle operazioni di calcolo della gittata massima, è emerso che i valori massimi di gittata per l'aerogeneratore proposto sono:

Gittata max distacco pala = 200,00 m

## 2.5 ANALISI DEI RICETTORI

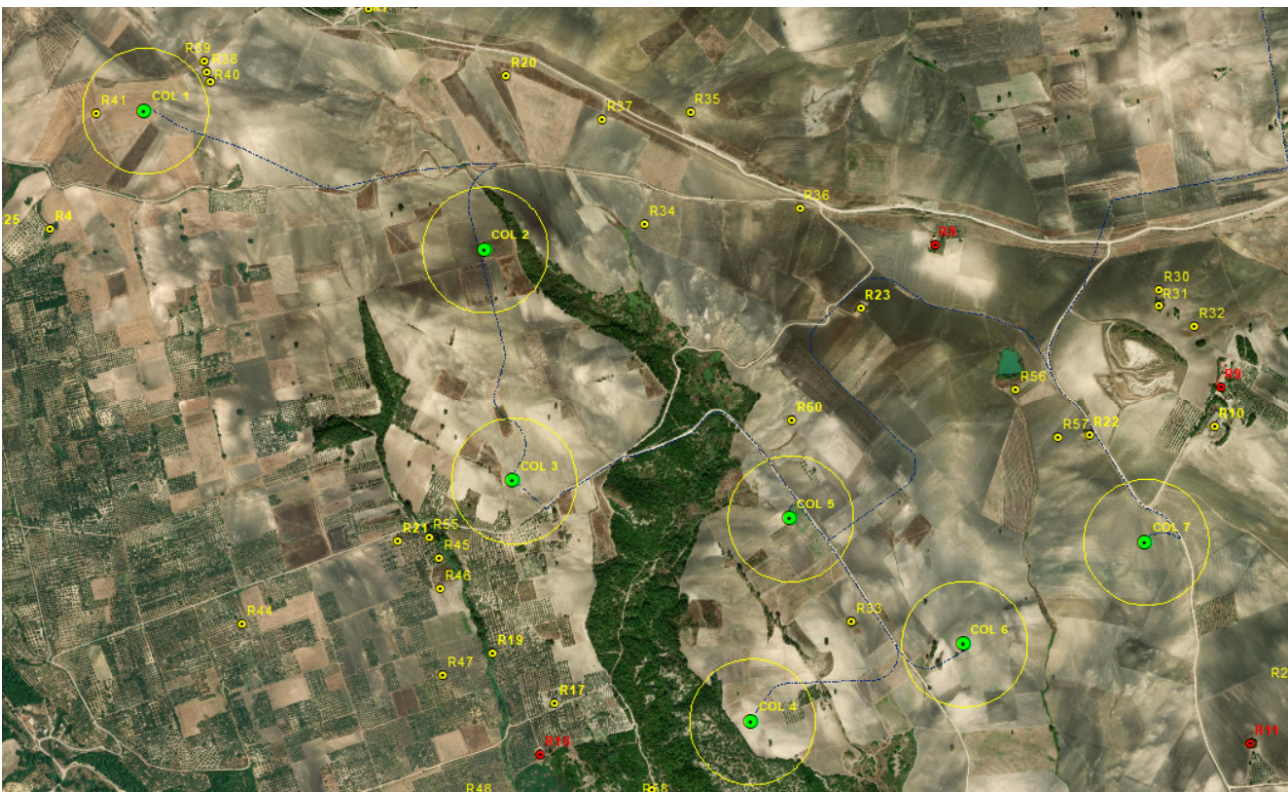


Figura 2: Individuazione planimetrica dei ricettori nel buffer di 200 metri

L'individuazione e la scelta dei fabbricati da considerare come ricettori sensibili nella verifica dell'impatto in caso di rottura accidentale della pala, è stata effettuata individuando in un raggio 200 metri i fabbricati esistenti e se del caso, verificare la destinazione d'uso degli stessi.

Si rappresenta che nell'area intorno agli aerogeneratori per un raggio di 200 metri, non si riscontrano fabbricati ad uso abitativo. Solo in prossimità della COL 01 risulta il ricettore R41, che da sopralluoghi e studi catastali in realtà non è un edificio; catastalmente è indicato un suolo seminativo

<b>GRV Wind Molise 1 S.r.l.</b> 	<b>Relazione sullo studio della gittata degli elementi rotanti</b>	Cod. AS239-SI10-R	
		Data 15/12/2021	Rev. 00

## 2.6 CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA – DISTACCO FRAMMENTO DI 10 M

Benché il distacco di un frammento di pala è da considerarsi un evento pressoché impossibile, sarà comunque preso in considerazione il calcolo della gittata di un frammento di pala di 10 m (e successivamente di 5 m) considerando questa volta l'attrito viscoso dell'aria prodotto su di esso durante la caduta.

Sottolineiamo che tutte le approssimazioni e semplificazioni proposte precedentemente per il distacco dell'intera pala sono a vantaggio di sicurezza in quanto, non si è tenuto conto delle dissipazioni causate dalle forze viscosse dovute alla resistenza prodotta dall'aria. Se ne terrà invece in conto per il distacco dei frammenti in quanto, le forze di inerzia dovute al movimento dell'oggetto e la risultante delle forze resistenti dovuta all'aria, saranno comparabili e quindi non più trascurabili.

La velocità di rotazione al momento del distacco, presa in considerazione per il calcolo, è quella massima indicata dal costruttore. È evidente che i sofisticati sistemi di controllo non permetterebbero al rotore dell'aerogeneratore di ruotare ad una velocità maggiore di quelle indicate nelle specifiche tecniche.

Le assunzioni del modello sono:

- 1) Si fa riferimento al baricentro del corpo (sulla base di forma e dimensione opportunamente ipotizzate) e si applicano ad esso le equazioni del moto.
- 2) Si assume come velocità iniziale  **$v_0$**  il vettore applicato nel baricentro di cui al punto precedente al momento del distacco, avente come modulo la velocità tangenziale corrispondente alla massima velocità angolare di esercizio per un raggio pari alla distanza del baricentro dal centro di rotazione e come direzione quella della tangente nello stesso baricentro al moto circolare da esso mantenuto fino al momento del distacco.
- 3) Si determina l'angolo  **$\alpha_0$**  per il quale la gittata è massima. La definizione di questo valore avviene per tentativi successivi, e dipende essenzialmente dalla geometria del sistema (altezza mozzo, diametro rotore, dimensioni del frammento) e dalla velocità di rotazione al momento del distacco.
- 4) Si tiene conto, nel volo e nella traiettoria del corpo, della spinta generata dal vento in direzione ortogonale al piano del rotore che per convenzione porremo come il piano XZ e che tenderà a spostare il corpo stesso dal piano di rotazione XZ del rotore. La velocità di spinta del vento considerata è quella massima a cui funziona l'aerogeneratore (cut off).
- 5) Il modulo della forza di attrito agente sul frammento in moto libero dopo il distacco è dato dalla formula.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{XZ}^2$$

<b>GRV Wind Molise 1 S.r.l.</b> 	<b>Relazione sullo studio della gittata degli elementi rotanti</b>	Cod. AS239-SI10-R	
		Data 15/12/2021	Rev. 00

Dove:

- $\rho_{aria}$  è la densità dell'aria che cambia in relazione alla quota altimetrica del sito di installazione degli aerogeneratori ma anche in base alle dimensioni e quindi massime altezze raggiunte dal sistema torre tubolare + rotore. In questo caso è posta pari a  $0,898 \text{ Kg/m}^3$ .
- $C_d$  è il coefficiente di attrito ampiamente dipendente delle caratteristiche geometriche della pala. Sulla base di dati riportati in letteratura tale valore è stato assunto pari a 1.
- $A$  è la superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria. Nel caso di un frammento di pala di 10 m, si è considerata una superficie efficace di 5 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala e del frammento e del moto rotazionale complesso a cui il frammento è sottoposto.
- $V_{xz}$  è il modulo della proiezione del vettore velocità del corpo sul piano XZ misurata con riferimento al baricentro del corpo

6) Il moto libero di un corpo di massa nota  $M$  sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto, quindi, dalle seguenti equazioni:

$$a_x = -1/M \times F_D \times \cos\alpha$$

$$a_y = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times (w - V_y)^2 / M$$

$$a_z = -1/M \times (F_D \times \sin\alpha + M \times g)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}$$

Dove:

- $\alpha$  rappresenta l'arcotangente del rapporto  $V_z / V_x$  e cambia da istante a istante durante il moto libero di caduta;
- $w$  è il modulo della velocità del vento, supposta ortogonale al piano XZ e costante per tutta la durata del moto;
- $V_y$  è il modulo della componente della velocità del corpo avente la stessa direzione del vento;
- $g$  è l'accelerazione di gravità.

Le condizioni al contorno indipendenti sono:

- temperatura ambiente e velocità del vento, impostate nei valori estremi di esercizio come precedentemente esposto;

<b>GRV Wind Molise 1 S.r.l.</b> 	<b>Relazione sullo studio della gittata degli elementi rotanti</b>	Cod. AS239-SI10-R	
		Data 15/12/2021	Rev. 00

- altezza del mozzo posta pari a 115 m.
- massa M, area efficace A, lunghezza L posizione del baricentro del corpo distaccato (posta a 1/3 della lunghezza nel caso dell'intera pala e a 1/2 nel caso di un frammento);
- $\alpha_0$  viene inizializzato al valore arbitrario di  $20^\circ$ , prossimo a valori descritti in letteratura per analoghi esperimenti;
- si pongono ascissa e ordinata del baricentro del corpo al momento del distacco  $X_0=0$  e  $Y_0=0$
- si pone la componente iniziale del vettore velocità in direzione del vento  $V_{y0}=0$ , in quanto tale vettore, nel momento del distacco, è determinato dal solo movimento del rotore che è supposto ortogonale al vento stesso;

La soluzione del sistema di equazioni viene determinata con il metodo di Eulero che è un metodo iterativo per la risoluzione di equazioni differenziali partendo dalle condizioni al contorno. Tale soluzione ci permetterà di definire il moto del corpo distaccato nello spazio tridimensionale rappresentato in un sistema cartesiano ortogonale XYZ, in cui:

- il piano XY rappresenta il piano orizzontale, corrispondente al livello del mare;
- il piano XZ viene fatto coincidere con il piano su cui giace il rotore (ortogonale alla direzione del vento);
- il piano YZ viene fissato, ortogonalmente agli altri due piani coordinati, facendo coincidere l'origine del sistema con la proiezione sul piano XY del baricentro del corpo nell'istante del distacco.

Con questa rappresentazione geometrica è evidente che al momento della definizione della gittata massima si dovrà tenere in conto della lunghezza del corpo in caduta, ma anche della geometria del modello. Ora, poiché la gittata è calcolata a partire dal mozzo, dovrà essere calcolata la distanza tra mozzo e punto di caduta del baricentro del corpo distaccato.

Nel punto di caduta si dovrà tenere poi in conto della lunghezza del frammento o della pala.

I parametri fisici e geometrici che sia assumeranno saranno i seguenti:

- $M= 1600$  kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo.
- Altezza mozzo  $Q_t= 115$  m, diametro rotore 170 m, lunghezza pala 85 m, lunghezza frammento 10 m, velocità di rotazione 8,5 giri/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore).

- $C_d = 1$ , sulla base di dati riportati in letteratura.
- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, si assume pari a 5 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala e del frammento e del moto rotazionale complesso a cui il frammento è sottoposto.
- Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo  $\alpha$  a cui avviene la gittata massima. Nel caso in esame il risultato è stato  $\alpha = 20^\circ$ .
- Densità dell'aria  $\rho = 0,898 \text{ kg/m}^3$ , pari alla densità dell'aria con temperatura di  $40^\circ\text{C}$  alla quota di 200 m s.l.m. (valori limite che determina la condizione più sfavorevole nel calcolo).

Il valore della gittata massima ottenuto dal calcolo è

$$G_{\text{Max}} = 335 \text{ m}$$

Con tempo di permanenza in volo di 10 secondi circa.

Di seguito sono riportati i grafici delle traiettorie calcolati al variare dell'angolo di lancio con il metodo complesso:

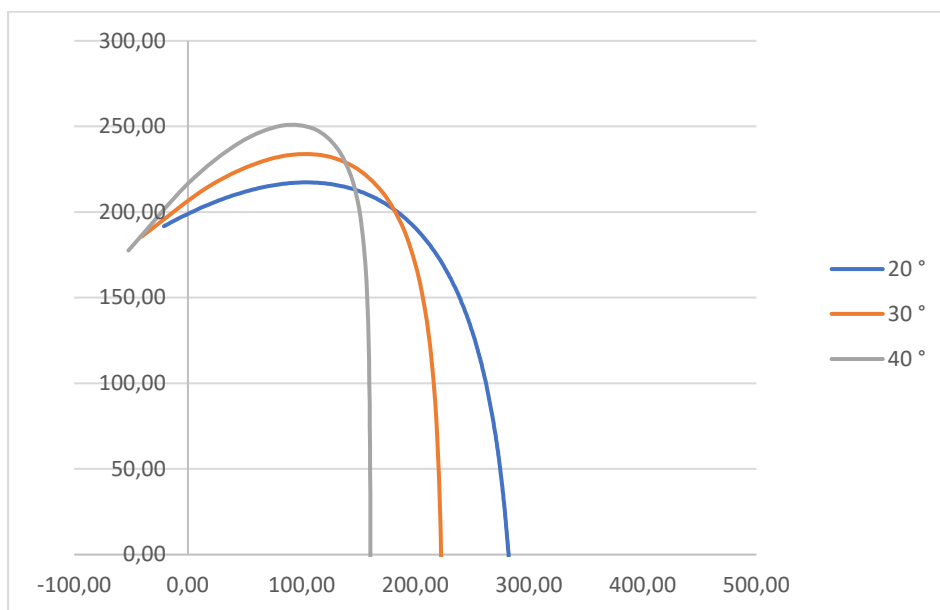


Figura 3: Grafica della traiettoria di un frammento di pala di 10 m.

## 2.7 CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA – DISTACCO FRAMMENTO 5 M

Benché, come detto, il distacco di un frammento di pala è da considerarsi un evento pressoché impossibile di seguito si riporta il valore della gittata massima nel caso di un frammento di lunghezza pari a 5 m.

I parametri fisici e geometrici che si assumeranno saranno i seguenti:



-  $M = 800$  kg in relazione alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo

- Altezza mozzo  $H_t = 115$  m, diametro rotore 170 m, lunghezza pala 85 m, lunghezza frammento 5 m, velocità di rotazione 8,5 giri/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore).

- $C_d = 1$ , sulla base di dati riportati in letteratura
- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, si assume pari a 3 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala e del frammento e del moto rotazionale complesso a cui il frammento è sottoposto.
- Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo  $\alpha_0$  a cui avviene la gittata massima. Nel caso in esame il risultato è stato  $\alpha_0 = 20^\circ$ .
- Densità dell'aria  $\rho = 0,898$  kg/m<sup>3</sup>, pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 200 m s.l.m. (valori limite che determina la condizione più sfavorevole nel calcolo).

Il valore della gittata massima ottenuto dal calcolo è

$$G_{Max} = 284,2 \text{ m}$$

Con tempo di permanenza in volo di 12 secondi circa.

Di seguito sono riportati i grafici delle traiettorie calcolati al variare dell'angolo di lancio con il metodo complesso:

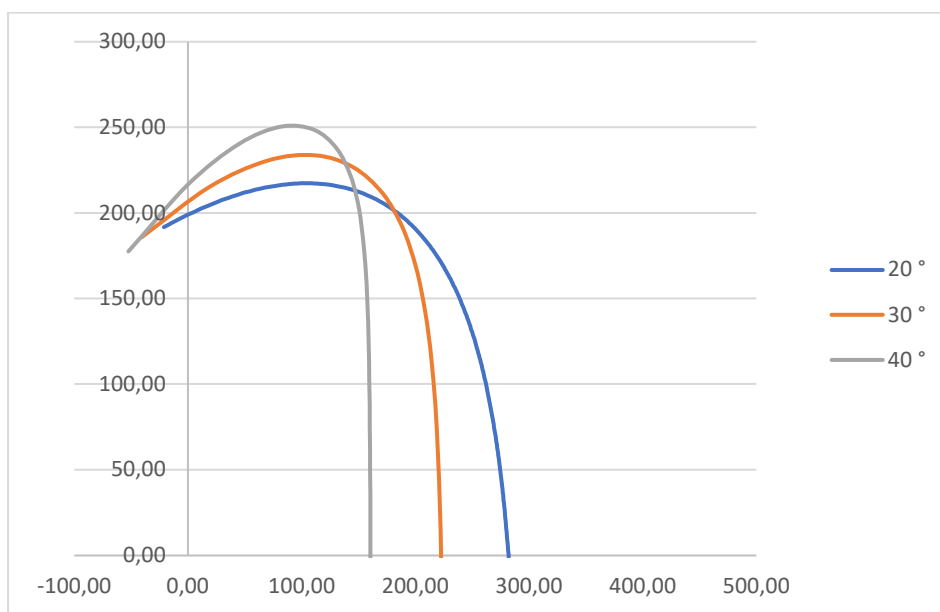


Figura 4: Grafica della traiettoria di un frammento di pala di 5 m.

<b>GRV Wind Molise 1 S.r.l.</b> 	<b>Relazione sullo studio della gittata degli elementi rotanti</b>	Cod. AS239-SI10-R	
		Data 15/12/2021	Rev. 00

### 3 CONCLUSIONI

La definizione del moto di una pala di un aerogeneratore o di un frammento di pala è un problema alquanto complesso. È certo sulla base dell'esperienza e di semplici considerazioni fisiche (conservazione della quantità di moto) che trattasi di un moto rotazionale complesso in un fluido viscoso (aria).

Dal momento che sono stati considerati per ciascun parametro valori ampiamente conservativi e mettendosi nelle condizioni di esercizio più gravose (massima velocità di rotazione, massima velocità del vento), il valore della gittata calcolato si può considerare ampiamente conservativo, pertanto da considerarsi quale Gittata Massima.

Il calcolo è stato poi eseguito risolvendo le stesse equazioni nel caso in cui il distacco fosse riferito a frammenti di pala, benché tale evento è da considerarsi pressoché impossibile.

Dai calcoli è risultato che la massima gittata degli elementi rotanti che possono essere proiettati dagli aerogeneratori in progetto è certamente inferiore a 250 metri nel caso di pala intera e inferiore a 400 m per frammenti di 10 e 5 m.

La gittata dipende dal peso del frammento e dalla sua superficie efficace di resistenza al moto. Non è detto che un frammento più piccolo abbia una gittata maggiore. Nei casi calcolati il frammento di 10 m va più lontano di quello di 5 m.

Anche nel caso peggiore, la gittata si mantiene al di sotto dei 350 m e rispetto agli aerogeneratori non esistono edifici sensibili.

I ricettori interessati dall'areale di 350 m, sono i ricettori R38, R39, R40 e R41 per distanza da COL01; i ricettori R45 e R55 per la COL 03 e R60 per la COL 05.

I sopracitati ricettori sono tutti non sensibili, come da studio dei ricettori allegato al progetto.



Figura 5: Individuazione planimetrica dei ricettori nel buffer di 350 metri

Nei buffer di 350 metri, si rileva la presenza di strade a servizio del parco eolico. Sono comunque rispettate le distanze dalle strade nazionali e provinciali di 150 m come da Linee Guida Nazionali del 2010.