

REGIONE PUGLIA
PROVINCIA DI FOGGIA

Comune:
Bovino -Deliceto - Castelluccio dei Sauri
Località "Monte Livagni"

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO DI
PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA E RELATIVE
OPERE DI CONNESSIONE - 10 AEROGENERATORI -

Sezione:
CALCOLO DELLA GITTATA - GC

Titolo elaborato:
**RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN
AEROGENERATORE**

N. Elaborato: **GC.SIA01**

Scala:

Committente

WINDERG S.r.l.

Via Trento, 64
Vimercate (MB)
P.IVA 04702520968

Amministratore Unico
Michele GIAMBELLI

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 2018	GV sigla	PM sigla	NF sigla	Emissione Progetto Definitivo - V.I.A.
Nome File sorgente	GE.BOV01.PD.GC.SIA01.doc - dwg	Nome file stampa	GE.BOV01.PD.GC.SIA01.pdf	Formato di stampa	A4

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 1 di 19</p>
---	---	--	--

INDICE

1.	PREMESSA.....	2
2.	IPOTESI DI CALCOLO.....	3
3.	CALCOLO DELLA LEGGE DEL MOTO.....	3
4.	CALCOLO GITTATA NEL CASO DI DISTACCO NEL PUNTO DI ATTACCO DEL MOZZO.....	7
4.1.	Calcolo del baricentro.....	7
4.2.	Calcolo della velocità periferica.....	7
4.3.	Calcolo di hg.....	8
4.4.	Calcolo della gittata.....	8
5.	CALCOLO GITTATA NEL CASO DI ROTTURA DI UN FRAMMENTO A 5 m DALLA PUNTA DELLA PALA.....	11
5.1.	Calcolo del baricentro.....	11
5.2.	Calcolo della velocità periferica.....	12
5.3.	Calcolo di hG.....	12
5.4.	Calcolo della gittata del frammento.....	12
6.	APPLICAZIONE DELLO STUDIO AL PROGETTO IN ESAME.....	16
7.	CONCLUSIONI.....	18

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 2 di 19</p>
---	---	--	--

1. PREMESSA

Il progetto riguarda la realizzazione di un impianto eolico denominato “Valle Verde” costituito da dieci aerogeneratori, di cui 7 da 3 MW ciascuno e 3 da 3,45 MW ciascuno, da installare nel comune di Bovino (FG) in località “Monte Livagni” e con opere di connessione ricadenti anche nei Comuni di Castelluccio dei Sauri (FG) e Deliceto (FG). Proponente dell’iniziativa è la società WINDERG Srl.

Il collegamento dell’impianto alla rete elettrica di trasmissione nazionale avviene mediante un cavidotto interrato in media tensione che si collegherà ad una sottostazione di trasformazione e consegna 30/150 KV.

Il progetto prevede due tracciati del cavidotto MT. Il tracciato di progetto segue la SP104, la SP120, strade locali e strade a servizio di impianti eolici esistenti. L’ipotesi alternativa segue la SP102, la strada comunale “Deliceto Ascoli Satriano”, strade locali, e si sviluppa parallelamente al tracciato del cavidotto esistente a servizio dell’impianto eolico di proprietà della società Vibinum srl.

La sottostazione di trasformazione è prevista in prossimità della stazione elettrica RTN “Deliceto” esistente e, tramite un cavidotto interrato in alta tensione, si collegherà allo stallo condiviso previsto all’interno della sottostazione di trasformazione della società ATS ENERGIA PE SANT’AGATA srl (attualmente in iter autorizzativo). In alternativa è previsto il collegamento AT diretto tra la stazione di trasformazione e il futuro ampliamento della stazione RTN “Deliceto”.

La presente relazione riporta la procedura di prima approssimazione seguita per il calcolo della gittata massima di una pala di un aerogeneratore del tipo V-136 con altezza al mozzo 112 m e potenza 3000/3450 kW. Nel calcolo ci si è posti nell’ipotesi di distacco della stessa nel punto di serraggio sul mozzo, punto di maggiore sollecitazione, per evidente effetto di intaglio dovuto al collegamento. Questo calcolo viene eseguito al fine di prevedere possibili problemi che una simile eventualità, per quanto improbabile, possa procurare a cose o persone.

Lo studio riporta inoltre il calcolo della gittata nelle seguenti ipotesi:

- Rottura dell’intera pala considerando un angolo di lancio variabile;
- Rottura del frammento di pala (lunghezza 5 m) considerando sempre il lancio variabile.

Inoltre, con riferimento al distacco del frammento e all’angolo di maggiore gittata, si riportano i passaggi del calcolo della gittata al fine di giustificare il valore massimo ottenuto.

	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 3 di 19
---	---	---	---

2. IPOTESI DI CALCOLO

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo sono le più gravose possibili in modo da giungere a risultati sicuramente cautelativi. Il calcolo della gittata massima è stato effettuato considerando una riduzione massima della velocità periferica del 30%, senza ridurre la velocità angolare.

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 θ ;
- 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 $H = 112$ m
- Diametro del rotore $D = 136$ m, quindi lunghezza della pala 68 m
- Velocità di rotazione $V=10.7$ giri/min.

3. CALCOLO DELLA LEGGE DEL MOTO

Nel presente paragrafo viene descritta la relazione del moto utilizzata per il calcolo della gittata.

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 non trascurabili le forze ed il momento di resistenza dovute al mezzo in cui si svolge il moto (aria).

Nel caso di un proiettile non puntiforme, le equazioni che governano il moto sono rispettivamente la prima e la seconda equazione della dinamica:

$$M \cdot g = M a_g$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = 0$$

	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 4 di 19
---	---	---	---

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.

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, 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.

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, coincida 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.

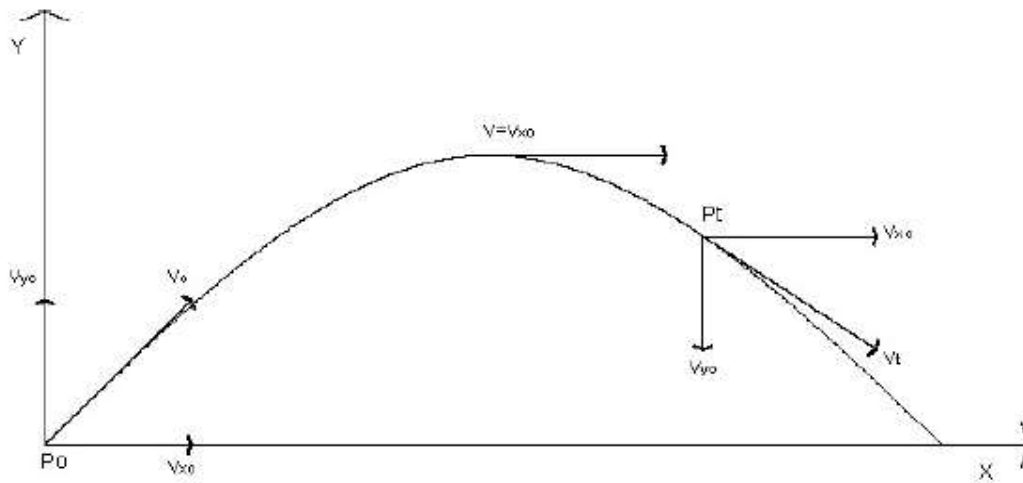
Si è scelto un sistema di riferimento con l'origine degli assi O centrata nel punto di partenza del corpo (x_0, y_0) , con l'asse delle Y positivo verso l'alto, e l'asse positivo delle X nello stesso verso del moto orizzontale del proiettile; le componenti dell'accelerazione saranno:

$$\ddot{x} = 0$$

$$\ddot{y} = -g$$

Dove $g = 9,81m/s^2$ è l'accelerazione di gravità.

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 ϑ come in figura:


Figura 1 - Traiettoria di un grave in caduta

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

$$x(t) = x_0 + v_x t$$

$$y(t) = y_0 + v_y t - \frac{1}{2} g t^2$$

Dove (x_0, v_0) è la posizione iniziale del punto materiale e (v_x, v_y) è la sua velocità. La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo T tale che $y(T) = 0$. Dalla legge del moto si ottiene:

$$T = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_y^2 + 2y_0 g}$$

Dove è stata scarta la soluzione corrispondente a tempi negativi

La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo ϑ e dalla velocità tangenziale V della pala al momento del distacco. Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$x_0 = -R \cos(\vartheta)$$

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

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

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

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 ϑ :

	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 6 di 19
---	---	---	---

$$G_{\max} = \frac{V_g \sin \vartheta}{g} \left[V_g \cos \vartheta + \sqrt{V_g^2 \cos^2 \vartheta + 2(H + R_g \sin(\vartheta))g} \right] - R_g \cos \vartheta$$

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

4. CALCOLO GITTATA NEL CASO DI DISTACCO NEL PUNTO DI ATTACCO DEL MOZZO

Lo schema adottato per il calcolo della gittata è il seguente, avendo indicato con G il baricentro del sistema avremo:

R_g = raggio del baricentro

V = velocità periferica del baricentro

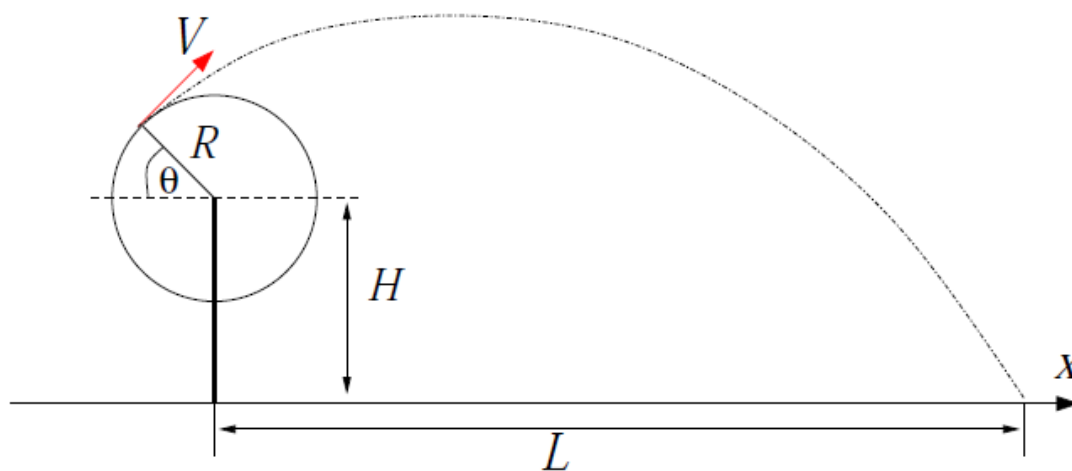


Figura 2 - Schema adottato per il calcolo della gittata

Prima di effettuare il calcolo della gittata, calcoliamo dei parametri che ci serviranno per il prosieguo 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 ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, cioè ad $R_g = 1/3 (D/2) = 22,67$ m per l'aerogeneratore di progetto (essendo $D = 136$ m).

4.2. Calcolo della velocità periferica

La velocità angolare media ω è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo. Indicando con n il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare e tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a 2π radianti, per n giri avremo $2\pi n$ radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare ω al minuto del corpo in movimento. Il dato di partenza è $n = 10,7$ giri/min che corrisponde ad una velocità angolare:

	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 8 di 19
---	---	---	---

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 1,12 \text{ rad/s}$$

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 (considerando la velocità massima del rotore fissata a 10,7 giri al minuto), corrisponde a:

$$V_g = \omega \cdot Rg = \frac{2\pi n}{60} \cdot Rg = 25,38 \frac{m}{s}$$

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 **17,77 m/s**.

4.3. Calcolo di hg

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 $Rg = 22,67$ m, essendo il raggio di ciascuna pala uguale a 68 m.

Di conseguenza l'altezza di lancio (hg) sarà uguale all'altezza dell'intera torre più il valore della proiezione di Rg sulla verticale ossia:

$$hg = H_{\text{torre}} + (Rg \cdot \sin \vartheta)$$

Dove H è l'altezza della torre.

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, viene valutato per i diversi valori dell'angolo ϑ .

4.4. Calcolo della gittata

Il calcolo della gittata è stato eseguito considerando diversi valori dell'angolo ϑ . La tabella seguente mostra i valori della gittata massima:

Angolo	Radianti	sen	coseno	Gittata (m)
0,00	0,00	0,00	1,00	-22,67
5,00	0,09	0,09	1,00	-11,81
10,00	0,17	0,17	0,98	-0,84
15,00	0,26	0,26	0,97	10,09
20,00	0,35	0,34	0,94	20,81
25,00	0,44	0,42	0,91	31,15
30,00	0,52	0,50	0,87	40,99
35,00	0,61	0,57	0,82	50,18
40,00	0,70	0,64	0,77	58,63
45,00	0,79	0,71	0,71	66,25
50,00	0,87	0,77	0,64	72,96
55,00	0,96	0,82	0,57	78,73
60,00	1,05	0,87	0,50	83,53
65,00	1,13	0,91	0,42	87,37
70,00	1,22	0,94	0,34	90,25
75,00	1,31	0,97	0,26	92,22
80,00	1,40	0,98	0,17	93,31
85,00	1,48	1,00	0,09	93,59
90,00	1,57	1,00	0,00	93,11
95,00	1,66	1,00	-0,09	91,95
100,00	1,75	0,98	-0,17	90,17
105,00	1,83	0,97	-0,26	87,86
110,00	1,92	0,94	-0,34	85,07
115,00	2,01	0,91	-0,42	81,87
120,00	2,09	0,87	-0,50	78,32
125,00	2,18	0,82	-0,57	74,49
130,00	2,27	0,77	-0,64	70,40
135,00	2,36	0,71	-0,71	66,11
140,00	2,44	0,64	-0,77	61,66
145,00	2,53	0,57	-0,82	57,07
150,00	2,62	0,50	-0,87	52,37
155,00	2,71	0,42	-0,91	47,58
160,00	2,79	0,34	-0,94	42,72
165,00	2,88	0,26	-0,97	37,79
170,00	2,97	0,17	-0,98	32,80
175,00	3,05	0,09	-1,00	27,76
180,00	3,14	0,00	-1,00	22,67

La gittata massima si ottiene per $\vartheta=85^\circ$ ed il risultato numerico è pari a **93,59 m**; questo valore rappresenta il valore della gittata massima per il distacco in corrispondenza del mozzo.

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 10 di 19</p>
---	---	--	---

Si ricorda che tale valore è stato determinato effettuando una riduzione del 30% della velocità periferica in modo da tener conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza che si generano al momento della rottura.

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 ovvero:

- Punto massima caduta: $93,59 + 43,33 = \mathbf{136,92\ m}$.

5. CALCOLO GITTATA NEL CASO DI ROTTURA DI UN FRAMMENTO A 5 m DALLA PUNTA 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.

Si individuano le seguenti grandezze:

R_g = raggio del baricentro del frammento (ovvero distanza del baricentro dal mozzo)

V_g = velocità periferica del baricentro

Avendo indicato con g il baricentro del sistema avremo

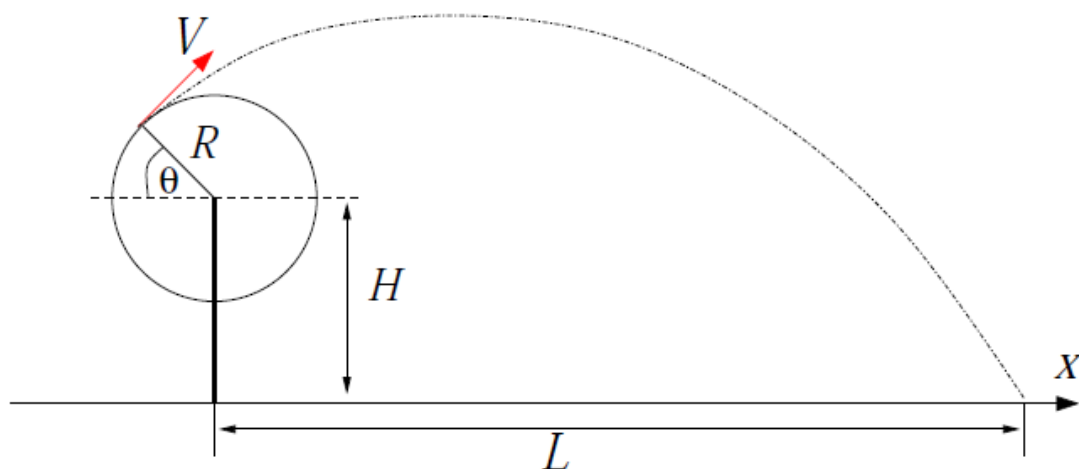


Figura 3 - Schema adottato per il calcolo della gittata

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

5.1. Calcolo del baricentro

Date le caratteristiche geometriche della pala, la lunghezza del frammento, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo del frammento, possiamo ritenere con buona approssimazione che il raggio del baricentro del frammento è determinato dalla seguente relazione:

$$R_g = \frac{D}{2} - \frac{2}{3} \text{lunghezza frammento} = 64,67m$$

Essendo $D=136$ m e il frammento lungo 5m.

	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 12 di 19
---	---	---	--

5.2. Calcolo della velocità periferica

Le modalità con le quali vengono calcolate la velocità periferica e la velocità angolare seguono quanto descritto nel paragrafo 3.2.

La velocità angolare media ω , che rappresenta l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo, è funzione del numero di giri a minuto (nel caso in esame **n = 10.7 giri/min**) ed è pari a:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 1,12 \text{ rad/s}$$

La velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio e alla velocità angolare, e corrisponde a:

$$V_g = \omega \cdot Rg = \frac{2\pi n}{60} \cdot Rg = 72,42 \frac{m}{s}$$

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 **50,70 m/s**.

5.3. Calcolo di hG

Il raggio del baricentro del frammento è lungo 64,67 m.

L'altezza di lancio sarà uguale a Hg, ovvero all'altezza dell'intera torre più il valore della proiezione di Rg sulla verticale ossia:

$$hg = H_{\text{torre}} + (Rg \cdot \sin \vartheta)$$

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, viene valutato per i diversi valori dell'angolo ϑ .

5.4. Calcolo della gittata del frammento

Il calcolo della gittata è stato eseguito considerando diversi valori dell'angolo ϑ . La tabella seguente mostra i valori della gittata massima:

Angolo	Radianti	sen	coseno	Gittata (m)
0,00	0,00	0,00	1,00	-64,67
5,00	0,09	0,09	1,00	-10,28
10,00	0,17	0,17	0,98	44,00
15,00	0,26	0,26	0,97	96,88
20,00	0,35	0,34	0,94	147,17
25,00	0,44	0,42	0,91	193,75
30,00	0,52	0,50	0,87	235,70
35,00	0,61	0,57	0,82	272,24
40,00	0,70	0,64	0,77	302,82
45,00	0,79	0,71	0,71	327,09
50,00	0,87	0,77	0,64	344,94
55,00	0,96	0,82	0,57	356,47
60,00	1,05	0,87	0,50	361,98
65,00	1,13	0,91	0,42	361,97
70,00	1,22	0,94	0,34	357,08
75,00	1,31	0,97	0,26	348,06
80,00	1,40	0,98	0,17	335,70
85,00	1,48	1,00	0,09	320,84
90,00	1,57	1,00	0,00	304,25
95,0	1,66	1,00	-0,09	286,62
100,0	1,75	0,98	-0,17	268,56
105,0	1,83	0,97	-0,26	250,54
110,0	1,92	0,94	-0,34	232,92
115,0	2,01	0,91	-0,42	215,94
120,0	2,09	0,87	-0,50	199,76
125,0	2,18	0,82	-0,57	184,47
130,0	2,27	0,77	-0,64	170,07
135,0	2,36	0,71	-0,71	156,56
140,0	2,44	0,64	-0,77	143,89
145,0	2,53	0,57	-0,82	132,00
150,0	2,62	0,50	-0,87	120,82
155,0	2,71	0,42	-0,91	110,28
160,0	2,79	0,34	-0,94	100,30
165,0	2,88	0,26	-0,97	90,82
170,0	2,97	0,17	-0,98	81,76
175,0	3,05	0,09	-1,00	73,07
180,0	3,14	0,00	-1,00	64,67

	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 14 di 19
---	---	---	--

La gittata massima del frammento di 5m si ottiene per $\vartheta=60^\circ$ ed il risultato numerico è pari a **361,98 m**. Si ricorda che tale valore è stato determinato effettuando una riduzione del 30% della gittata massima dovuto all'attrito dell'aria e delle forze resistenti che si generano al momento della rottura del frammento.

Nota il valore di gittata massima, date le caratteristiche geometriche del frammento si può calcolare il punto in cui cade il vertice dello stesso.

Supponendo di prendere in considerazione l'ipotesi più pericolosa, ossia quella in cui il frammento 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 ovvero:

- Punto massima caduta: $361,98 + 3,33 = \mathbf{365,31 \text{ m}}$.

Si riportano a seguire tutti i passaggi del calcolo della gittata massima ottenuto in corrispondenza del valore di angolo pari a 60° .

Come indicato a pagina 6 il valore della gittata massima è dato dalla seguente formula:

$$G_{\max} = \frac{V_g \sin \vartheta}{g} \left[V_g \cos \vartheta + \sqrt{V_g^2 \cos^2 \vartheta + 2(H + R_g \sin(\vartheta))g} \right] - R_g \cos \vartheta$$

Con riferimento all'angolo di 60° si ricavano il valore del seno e del coseno dell'angolo:

$$\sin \vartheta = \sin 60 = 0,90$$

$$\cos \vartheta = \cos 60 = 0,50$$

da cui

$$\cos^2 \vartheta = 0,25$$

Si riporta il calcolo della Velocità

$$V_g = \omega \cdot R_g - \omega \cdot R_g \cdot F_r = 1,12 \cdot 64,67 - 1,12 \cdot 64,67 \cdot 0,30 = 50,70 \text{ m/s}$$

dove:

- La velocità angolare ω è pari a 10,7 giri/minuto ovvero 1,12 rad/sec

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</p>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 15 di 19
---	---	---	--

- Il raggio del baricentro del frammento R_g , valutato rispetto al punto di serraggio delle pale al mozzo, è pari alla lunghezza della pala – 2/3 della lunghezza del frammento, ovvero $68 \text{ m} - (2/3) \cdot 5 \text{ m} = 64,67$
- Fr è il fattore di resistenza assunto pari a 30%

da cui

$$V_g^2 = 2570 \text{ m}^2 / \text{s}^2$$

$$H = 112 \text{ m}$$

Sostituendo tutti i valori nella formula della gittata si ottiene:

$$G_{\text{max}} = 361,98 \text{ m}$$

Il valore di 415,29 m rappresenta la gittata massima del baricentro del frammento. Per avere il punto più lontano di caduta si somma alla gittata massima i 2/3 della lunghezza del frammento

Punto di massima caduta = $361,98 + 2/3 \cdot 5 = 365,31 \text{ m}$.

6. APPLICAZIONE DELLO STUDIO AL PROGETTO IN ESAME

Nel caso dell'impianto eolico "Valle Verde" in esame si prevede la realizzazione di 10 aerogeneratori ad asse orizzontale V136 con altezza mozzo di 112 metri. Le immagini a seguire riportano la distanza minima dell'impianto dalle strade provinciali e dai recettori.

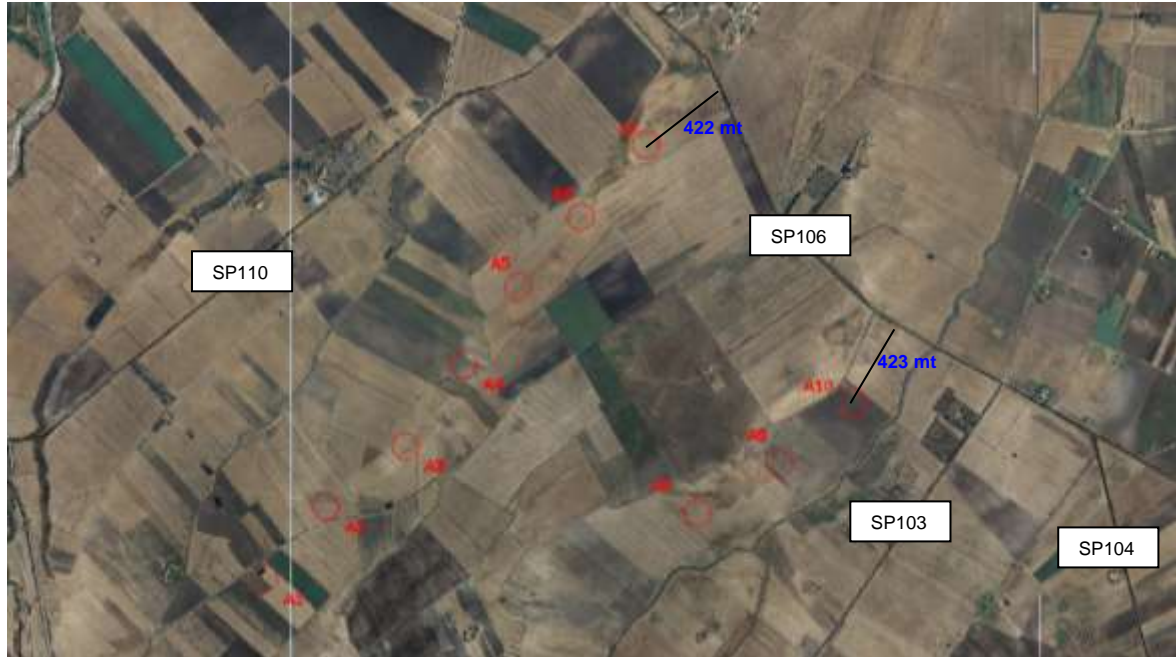


Figura 4: Distanze minime degli aerogeneratori dalle strade provinciali

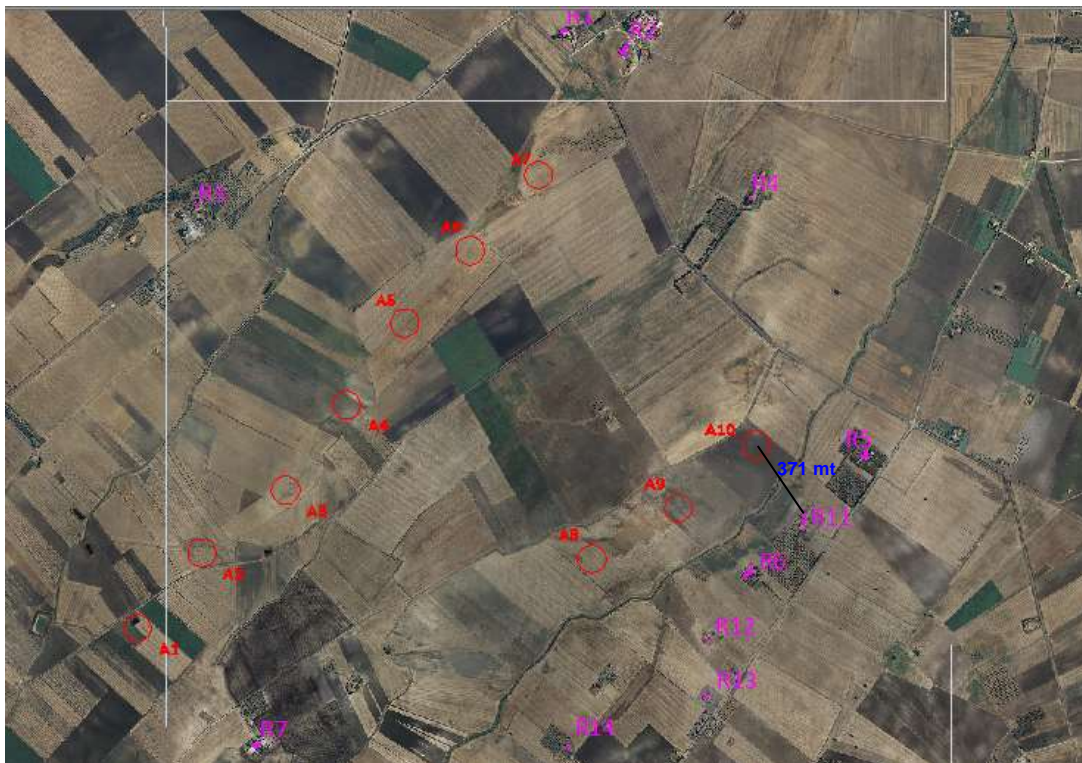


Figura 5: Distanze minime degli aerogeneratori dai recettori

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 17 di 19</p>
---	---	--	---

Dall'immagine si rileva che gli aerogeneratori si collocano ad una distanza minima di 422 m dalla strada provinciale più vicina (SP106) e ad una distanza di 371 m dal recettore più vicino.

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 18 di 19</p>
---	---	--	---

7. CONCLUSIONI

La progettazione dell'impianto eolico ha tenuto in debita considerazione il valore di gittata scaturito dal calcolo su presentato.

In base a quanto ottenuto per l'aerogeneratore di progetto il punto di caduta più lontano nel caso di rottura al mozzo corrisponde a **136,92 metri** e nel caso di rottura di un frammento della lunghezza di 5 m è pari a **365,31 m**. I valori di gittata sono stati ottenuti considerando una riduzione della velocità periferica del 30%, per tener conto delle forze resistenti e dell'attrito dell'aria.

La distanza minima degli aerogeneratori di progetto dalle strade provinciali (422 m) e dai recettori (371m) sono maggiori dei valori di gittata. Si conclude quindi che nell'ipotesi remota di rottura di una pala di un aerogeneratore si è in sicurezza.

Il calcolo della gittata effettuato si basa su un modello teorico. Diversi studi, tipo quello Vestas e quello DEWI, hanno approfondito la tematica giungendo a delle conclusioni che di seguito si sintetizzano.

In primo luogo si fa presente che il calcolo di gittata del frammento è stato effettuato considerando il distacco degli ultimi 5m della pala come richiesto dall'ARPA, anche se il calcolo di distacco di frammenti o porzioni di guscio risulta problematico e privo di basi computazionali, in quanto lo stabilire le dimensioni reali del pezzo di guscio distaccato è del tutto aleatorio e non dipendente da una causa specifica come quelle collegabili ad una discontinuità, un difetto di progettazione o di realizzazione della pala.

Il caso di distacco di porzioni di pala si potrebbe al più trattare effettuando un'analisi del rischio che è dato dal prodotto fra la probabilità di occorrenza della specifica rottura e la gravità delle conseguenze. Una simile analisi comporterebbe comunque delle assunzioni arbitrarie fra le quali le dimensioni del pezzo di pala interessato al distacco e uno studio probabilistico sull'occorrenza e la gravità delle conseguenze. Per effettuare queste valutazioni è necessaria la conoscenza di tutta una serie di circostanze circa gli eventi di questo tipo e la base statistica degli eventi incidentali dovrebbe essere notevolmente ampia, la qual cosa non è verificata nella realtà.

Dall'analisi della flotta di aerogeneratori dello studio Vestas si può assumere che il fenomeno di rottura degli organi rotanti di un aerogeneratore risulta altamente improbabile per il distacco intero della pala, e che per effetto della fulminazione atmosferica frammenti di pala, solitamente di piccole dimensioni, sono stati ritrovati a non più di 40-50 m dalla base dell'aerogeneratore.

Inoltre, secondo lo studio di DEWI OCC le percentuali dei guasti annuali stimate hanno un valore di 4.2×10^{-4} per la rottura delle pale e/o di parti di esse.

Tali valori, per come sono stati ricavati, possono ritenersi oltre che molto bassi anche decisamente cautelativi; infatti, il parco turbine su cui sono state fatte le statistiche comprende anche installazioni molto datate (anche ante 1984). Oggi i metodi di progettazione e costruzione degli aerogeneratori sono decisamente migliorati e rispondono a riconosciuti standard internazionali.

Pertanto la possibilità di rottura delle pale e/o delle parti delle pale è da ritenersi altamente improbabile, per cui i risultati a cui si è giunti sono altamente cautelativi.

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>GE.BOV01.PD.CG.SIA01 12/10/2018 18/10/2018 00 19 di 19</p>
---	---	--	---

Si conclude, quindi, che il progetto di impianto eolico denominato “Valle Verde”, proposto dalla società Winderg Srl nel territorio del Comune di Bovino in località M. Livagni, costituito da dieci aerogeneratori del tipo V136 con altezza al mozzo 112 m di cui 7 da 3 MW ciascuno e 3 da 3,45 MW ciascuno, non pone problemi alla pubblica sicurezza nell’ipotesi remota di rottura di una pala nel punto di serraggio al mozzo.