

REGIONE PUGLIA
PROVINCIA DI FOGGIA

Comune:
Castelluccio dei Sauri - Deliceto
Località " Cisterna - Posta Cisternola - Sterparo"

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

Sezione :
CALCOLO DELLA GITTATA - CG

Titolo elaborato:
RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UN AEROGENERATORE

N. Elaborato: CG.SIA01

Committente

WIND ENERGY CASTELLUCCIO S.r.l.

Via Caravaggio, 125
65125 Pescara (PE)
PEC: windcastellucciosrl@legpec.it

Amministratore Unico
Fabio MARESCA

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



00	Marzo 2018	GV sigla	PLM sigla	NF sigla	Emissione Progetto Definitivo -VIA
Rev.	Data	Elaborazione	Approvazione	Emissione	DESCRIZIONE
Nome File sorgente		GE.CDS01.PD.CG.SIA01.R00.doc	Nome file stampa	GE.CDS01.PD.CG.SIA01.R00.pdf	Formato di stampa A4

	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.CDS01.PD.CG.SIA01 16/03/2018 26/03/2018 00 1 di 13
---	--	---	---

INDICE

1.	PREMESSA.....	2
2.	IPOTESI DI CALCOLO.....	3
3.	CALCOLO DELLA LEGGE DEL MOTO	4
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.	APPLICAZIONE DELLO STUDIO AL PROGETTO IN ESAME.....	11
6.	CONCLUSIONI.....	13

	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.CDS01.PD.CG.SIA01 16/03/2018 26/03/2018 00 2 di 13
---	--	---	---

1. PREMESSA

Il progetto riguarda la realizzazione di un impianto eolico costituito da dodici aerogeneratori ognuno da 3,6 MW da installare nel comune di Castelluccio dei Sauri (FG) in località “Cisterna”, “Posta Cisternola”, “Sterparo” e con opere di connessione ricadenti anche nel comune di Deliceto (FG). Proponente dell’iniziativa è la società Wind Energy Castelluccio Srl.

La presente relazione riporta la procedura di prima approssimazione seguita per il calcolo della gittata massima di una pala di un aerogeneratore del tipo SENVION M-140 con altezza al mozzo 110m e potenza 3600 kW. Nel calcolo ci si è posti nell’ipotesi di distacco della pala 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 il calcolo della gittata nell’ipotesi di rottura dell’intera pala considerando un angolo di lancio variabile.

	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.CDS01.PD.CG.SIA01 16/03/2018 26/03/2018 00 3 di 13
---	--	---	---

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 $H = 110$ m
- Diametro del rotore $D = 140$ m, quindi lunghezza della pala 70 m
- Velocità di rotazione $V=9,6$ giri/min.

	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.CDS01.PD.CG.SIA01 16/03/2018 26/03/2018 00 4 di 13
---	--	---	---

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:

$$M \cdot g = Ma_g$$

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

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 (x0, y0), 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 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ 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:

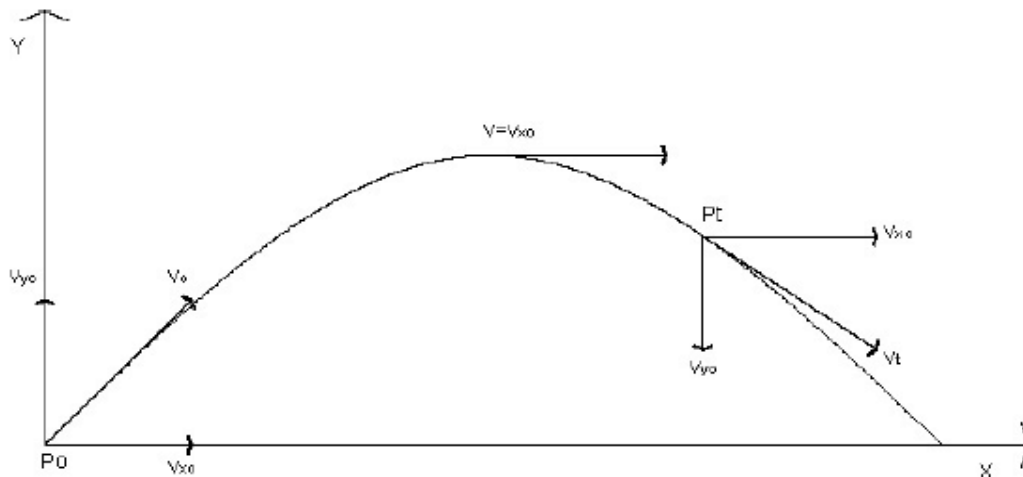


Figura 1 - Traiettoria di un grave in caduta

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, y_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:

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

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

	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.CDS01.PD.CG.SIA01 16/03/2018 26/03/2018 00 6 di 13
---	--	---	---

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

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

La gittata G è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo della 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 :

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

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

	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.CDS01.PD.CG.SIA01 16/03/2018 26/03/2018 00 7 di 13
---	--	---	---

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

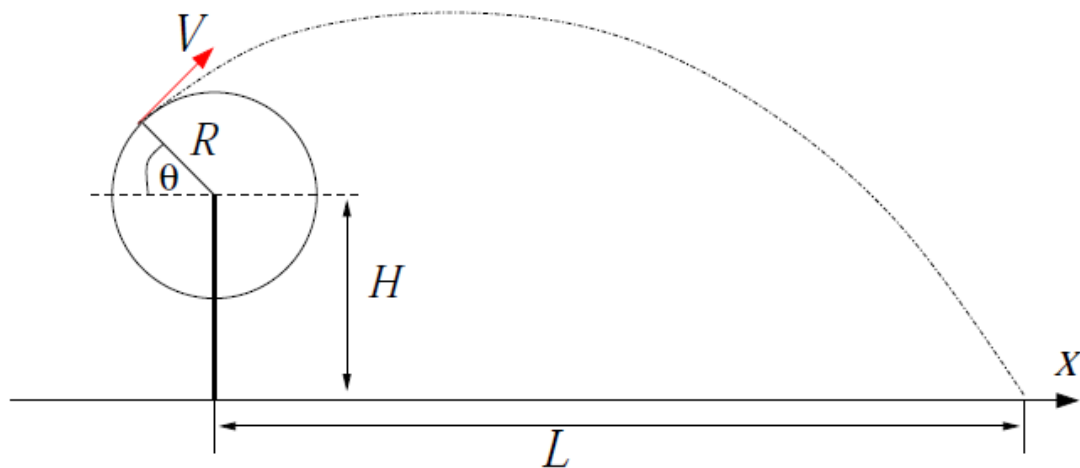


Figura 2 - Schema adottato per il calcolo della gittata

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 $R_g = 1/3 (D/2) = 23,33$ m per l'aerogeneratore di progetto (essendo $D = 140$ 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 partenziale è $n = 9,6$ giri/min che corrisponde ad una velocità angolare:

	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.CDS01.PD.CG.SIA01 16/03/2018 26/03/2018 00 8 di 13
---	--	---	---

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

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 pari a 9,6 giri al minuto), corrisponde a:

$$V_g = \omega \cdot Rg = \frac{2\pi n}{60} \cdot Rg = 23,45 \frac{m}{s}$$

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 **16,41 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 $Rg = 23,33$ m, essendo il raggio di ciascuna pala uguale a 70 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	Radiani	sen	coseno	Gittata (m)
0,00	0,00	0,00	1,00	-23,33
5,00	0,09	0,09	1,00	-13,62
10,00	0,17	0,17	0,98	-3,76
15,00	0,26	0,26	0,97	6,10
20,00	0,35	0,34	0,94	15,81
25,00	0,44	0,42	0,91	25,23
30,00	0,52	0,50	0,87	34,24
35,00	0,61	0,57	0,82	42,73
40,00	0,70	0,64	0,77	50,59
45,00	0,79	0,71	0,71	57,74
50,00	0,87	0,77	0,64	64,12
55,00	0,96	0,82	0,57	69,69
60,00	1,05	0,87	0,50	74,41
65,00	1,13	0,91	0,42	78,28
70,00	1,22	0,94	0,34	81,31
75,00	1,31	0,97	0,26	83,51
80,00	1,40	0,98	0,17	84,93
85,00	1,48	1,00	0,09	85,60
90,00	1,57	1,00	0,00	85,57
95,00	1,66	1,00	-0,09	84,90
100,00	1,75	0,98	-0,17	83,64
105,00	1,83	0,97	-0,26	81,86
110,00	1,92	0,94	-0,34	79,62
115,00	2,01	0,91	-0,42	76,97
120,00	2,09	0,87	-0,50	73,97
125,00	2,18	0,82	-0,57	70,65
130,00	2,27	0,77	-0,64	67,08
135,00	2,36	0,71	-0,71	63,28
140,00	2,44	0,64	-0,77	59,30
145,00	2,53	0,57	-0,82	55,16
150,00	2,62	0,50	-0,87	50,88
155,00	2,71	0,42	-0,91	46,49
160,00	2,79	0,34	-0,94	42,01
165,00	2,88	0,26	-0,97	37,44
170,00	2,97	0,17	-0,98	32,81
175,00	3,05	0,09	-1,00	28,10
180,00	3,14	0,00	-1,00	23,33

	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.CDS01.PD.CG.SIA01 16/03/2018 26/03/2018 00 10 di 13
---	--	---	--

La gittata massima si ottiene per $\vartheta=85^\circ$ ed il risultato numerico è pari a **85,60 m**; questo valore rappresenta il valore della gittata massima per il distacco in corrispondenza del mozzo.

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: $85,60 + 46,66 = \mathbf{132,26\ m}$.

	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.CDS01.PD.CG.SIA01 16/03/2018 26/03/2018 00 11 di 13
---	--	---	--

5. APPLICAZIONE DELLO STUDIO AL PROGETTO IN ESAME

Nel caso dell'impianto eolico in esame si prevede la realizzazione di 12 aerogeneratori ad asse orizzontale Senvion M140 ognuno di potenza singola 3600 kW con altezza mozzo di 110 metri. Le immagini a seguire riportano la distanza minima dell'impianto dalle strade provinciali e dai recettori.



Figura 3: Distanze minime degli aerogeneratori dalle strade provinciali



Figura 4: Distanze minime degli aerogeneratori dai recettori

Dalle immagini si rileva che gli aerogeneratori di progetto si collocano ad una distanza minima di 453 m dalla strada provinciale più vicina (SP106) e ad una distanza di 412 m dal recettore più vicino.

	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.CDS01.PD.CG.SIA01 16/03/2018 26/03/2018 00 13 di 13
---	--	---	--

6. 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 **132,26 metri**. 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 (453 m) e dai recettori (412 m) 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 e che il progetto di impianto eolico proposto dalla società Wind Energy Castelluccio Srl nel territorio del Comune di Castelluccio dei Sauri in località "Cisterna", "Posta Cisternola", "Sterparo", costituito da dodici aerogeneratori del tipo SENVION M-140 con altezza al mozzo 110 m da 3,6 MW, non pone problemi alla pubblica sicurezza nell'ipotesi remota di rottura di una pala nel punto di serraggio al mozzo.