

PROPONENTE

Repower Renewable Spa

Via Lavaredo, 44
30174 Mestre (VE)

PROJECT MANAGER : Dott.Giuseppe Caricato



PROGETTAZIONE



Tenproject Srl -via De Gasperi 61
82018 S.Giorgio del Sannio (BN)
t +39 0824 337144 - f +39 0824 49315
tenproject.it - info@tenproject.it

N° COMMESSA

1478

NUOVO PARCO EOLICO CASAMASSIMA "LOC. PARCO SAN NICOLA" e "VILLA ABBADO"
PROVINCIA DI BARI
COMUNI DI CASAMASSIMA - RUTIGLIANO - TURI

PROGETTO DEFINITIVO PER AUTORIZZAZIONE



CODICE ELABORATO

RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN
AEROGENERATORE

SIA10.CG.01

NOME FILE
1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00

00	12/2021	PRIMA EMISSIONE	GV	NF	NF
REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE	REDATTO	VERIFICA	APPROVAZIONE

	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 1 di 20
---	--	---	---

INDICE

1.	PREMESSA.....	2
2.	IPOTESI DI CALCOLO.....	4
3.	CALCOLO DELLA LEGGE DEL MOTO	5
4.	CALCOLO GITTATA NEL CASO DI DISTACCO NEL PUNTO DI ATTACCO DEL MOZZO.....	8
4.1.	Schema di calcolo	8
4.2.	Calcolo del baricentro	8
4.3.	Calcolo della velocità periferica	8
4.4.	Calcolo di hg	9
4.5.	Calcolo della gittata.....	9
5.	CALCOLO GITTATA NEL CASO DI ROTTURA DI UN FRAMMENTO A 5 m DALLA PUNTA DELLA PALA.....	12
5.1.	Premessa	12
5.2.	Schema di calcolo	12
5.3.	Calcolo del baricentro	13
5.4.	Calcolo della velocità periferica	13
5.5.	Calcolo di hG.....	14
5.6.	Calcolo della gittata del frammento.....	14
6.	APPLICAZIONE DELLO STUDIO AL PROGETTO IN ESAME.....	18
7.	CONCLUSIONI.....	19

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE</p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 2 di 20</p>
---	--	--	--

1. PREMESSA

Il progetto descritto nella presente relazione riguarda la realizzazione di un impianto eolico costituito da 7 aerogeneratori della potenza di 6 MW ciascuno, per una potenza di 42 MW, integrato con un sistema di accumulo con batterie agli ioni da 15,2 MW, per una potenza complessiva in immissione di 57,2 MW, da installare nei comuni di Rutigliano, Turi e Casamassima, in Provincia di Bari in località "Parco San Nicola" e "Villa Abbado", con opere di connessione alla rete di trasmissione nazionale ricadenti nel comune di Casamassima in località "Patalino".

Proponente dell'iniziativa è la società Repower Renewable SpA (anche solo Repower nel prosieguo). La presente relazione riporta la procedura di prima approssimazione seguita per il calcolo della gittata massima di una pala di un aerogeneratore del tipo VESTAS V-150 con altezza al mozzo 125 m e potenza 6 MW. 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 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 l'angolo di lancio variabile.

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 ottenuto.

Si deve sottolineare che studi condotti da enti di ricerca e di certificazione rinomati internazionalmente dimostrano l'assoluta improbabilità del verificarsi di tali eventi.

La progettazione e realizzazione delle turbine eoliche di grande taglia segue procedure certificate a livello internazionale. In particolare, la progettazione industriale degli aerogeneratori di grande taglia segue la norma CEI EN 61400-1, che a livello nazionale ha trovato la sua "traduzione" a cura del CT 88 "Sistemi di generazione a turbina eolica" del CEI. Gli aerogeneratori di grande taglia che verranno installati per l'impianto eolico di progetto hanno tutte le certificazioni CEI EN 61400-1.

I casi di rotture di pale che oggi si registrano sono relativi ad aerogeneratori di piccola e piccolissima taglia (60 kW in particolare), che però sono realizzati da produttori spesso improvvisati e che vengono installati in siti non congruenti con la classe di vento utilizzata per la progettazione e la realizzazione delle torri e delle pale.

Si consideri che le norme di certificazione della progettazione dei sistemi di mini e micro eolico, CEI EN 61400-2, non sono le stesse degli aerogeneratori di grande taglia e molti modelli di piccola taglia non hanno diverse certificazioni che sono invece ormai fornite di routine dai produttori di aerogeneratori di grande taglia.

Infatti, il settore del mini e micro-eolico ha avuto una tardiva industrializzazione che ha generato una

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE</p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 3 di 20</p>
---	--	--	--

proposta di aerogeneratori al mercato poco affidabili, soprattutto in siti con livelli di turbolenze importanti. Il concomitante fattore della poca dimestichezza dei proponenti degli impianti di piccola taglia, spesso improvvisati e certamente non operatori industriali, con la complessità del fenomeno ventoso ha portato all'istallazione degli aerogeneratori senza adeguate campagne anemometriche e studi sulle caratteristiche del vento con conseguente aumento del rischio delle rotture.

Si pensi che per il mini e micro eolico non sono obbligatorie le certificazioni della curva di potenza e questo la dice lunga sulla loro affidabilità.

Gli aerogeneratori che saranno istallati per l'impianto eolico di progetto saranno muniti di:

- Dichiarazione CE di Conformità
- Fascicolo Tecnico CE
- Certificazione della curva di potenza da ente terzo (EN 61400-12 e EN 671400-21-1)
- Certificazione delle emissioni rumorose (EN 61400-11)
- Documenti di test, prove, certificazioni ai sensi della EN 61400-1, EN 61400-22
- Procedure standardizzate di prove di conformità, fabbricazione, piani di trasporto, piani di erezione, istallazione e manutenzione secondo la EN 61400-22.

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE</p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 4 di 20</p>
---	--	--	--

2. IPOTESI DI CALCOLO

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo sono le più gravose possibili e tali 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 (rif. figura 2) sono i seguenti:

- Altezza della torre $H = 125$ m
- Diametro del rotore $D = 150$ m, quindi lunghezza della pala $R = 75$ m
- Altezza massima dell'aerogeneratore $H+R = 200$ m
- Velocità di rotazione $V = 12,6$ giri/min.

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE</p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 5 di 20</p>
---	--	--	--

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:

$$M \cdot g = M a_g$$

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

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:

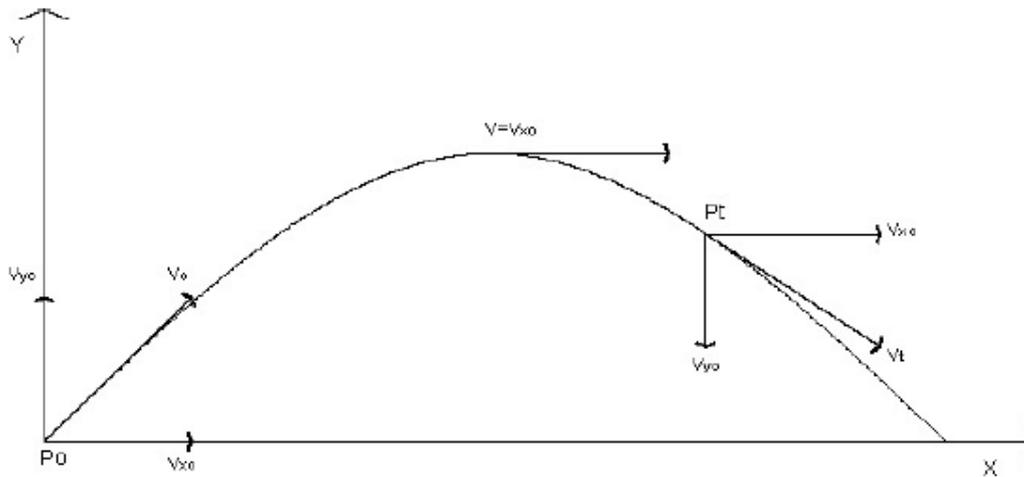


Figura 1 - Traiettoria di un grave in caduta

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, 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:

	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 7 di 20
---	--	---	---

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

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

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

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

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 :

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

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 .

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

4.1. Schema di calcolo

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

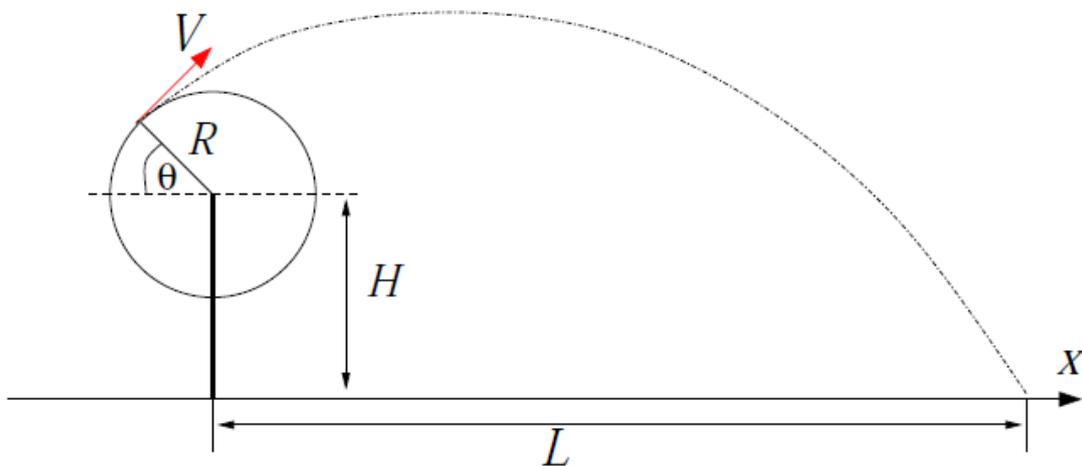


Figura 2 - Schema adottato per il calcolo della gittata

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

4.2. 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 a $R_g = 1/3 (D/2) = 25$ m per l'aerogeneratore di progetto (essendo $D = 150$ m).

4.3. 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 $n = 12,6$ giri/min che corrisponde ad una velocità angolare:

	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 9 di 20
---	--	---	---

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 1,32 \text{ rad/s}$$

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 11 giri al minuto), corrisponde a:

$$V_g = \omega \cdot Rg = \frac{2\pi n}{60} \cdot Rg = 33 \frac{m}{s}$$

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 **23 m/s**.

4.4. 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 $Rg = 25$ m, essendo il raggio di ciascuna pala uguale a 75 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 .

4.5. 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	-25,00
5,00	0,09	0,09	1,00	-8,92
10,00	0,17	0,17	0,98	7,24
15,00	0,26	0,26	0,97	23,20
20,00	0,35	0,34	0,94	38,69
25,00	0,44	0,42	0,91	53,47
30,00	0,52	0,50	0,87	67,32
35,00	0,61	0,57	0,82	80,06
40,00	0,70	0,64	0,77	91,51
45,00	0,79	0,71	0,71	101,58
50,00	0,87	0,77	0,64	110,17
55,00	0,96	0,82	0,57	117,24
60,00	1,05	0,87	0,50	122,80
65,00	1,13	0,91	0,42	126,86
70,00	1,22	0,94	0,34	129,50
75,00	1,31	0,97	0,26	130,78
80,00	1,40	0,98	0,17	130,82
85,00	1,48	1,00	0,09	129,72
90,00	1,57	1,00	0,00	127,63
95,00	1,66	1,00	-0,09	124,65
100,00	1,75	0,98	-0,17	120,93
105,00	1,83	0,97	-0,26	116,57
110,00	1,92	0,94	-0,34	111,70
115,00	2,01	0,91	-0,42	106,40
120,00	2,09	0,87	-0,50	100,78
125,00	2,18	0,82	-0,57	94,90
130,00	2,27	0,77	-0,64	88,84
135,00	2,36	0,71	-0,71	82,64
140,00	2,44	0,64	-0,77	76,35
145,00	2,53	0,57	-0,82	69,99
150,00	2,62	0,50	-0,87	63,60
155,00	2,71	0,42	-0,91	57,19
160,00	2,79	0,34	-0,94	50,77
165,00	2,88	0,26	-0,97	44,35
170,00	2,97	0,17	-0,98	37,91
175,00	3,05	0,09	-1,00	31,47
180,00	3,14	0,00	-1,00	25,00

 TENPROJECT	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 11 di 20
---	--	---	--

La gittata massima si ottiene per $\vartheta=80^\circ$ ed il risultato numerico è pari a **130,82 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 gravosa, 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: $130,82 + 50 = \mathbf{181\ m}$

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE</p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 12 di 20</p>
---	--	--	---

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

5.1. Premessa

Nel caso della rottura del frammento di pala vale ancor più quanto già detto per il caso della rottura dell'intera pala: le probabilità di accadimento di siffatte rotture per aerogeneratori industriali di grande taglia sono molto basse, come alcuni studi hanno dimostrato (studio effettuato dal produttore danese di aerogeneratori Vestas e studio effettuato dall'ente di certificazione tedesco DEWI OCC).

In più, il calcolo del distacco di frammenti o porzioni di guscio della pala risulta problematico e privo di basi computazionali robuste, 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 (caso della rottura nel punto di serraggio della pala), un difetto di progettazione o di realizzazione della pala.

Facendo riferimento allo studio della Vestas, l'analisi degli accadimenti sulla flotta di aerogeneratori installati ha permesso di concludere che il fenomeno di rottura degli organi rotanti di un aerogeneratore risulta altamente improbabile per il distacco intero della pala e che, in rari casi, 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.

Secondo lo studio dell'ente di certificazione tedesco DEWI OCC, effettuato su un numero elevatissimo di installazioni, 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, premeva inquadrare la problematica della rottura della pala o di un frammento di essa nella giusta cornice, evidenziando che la possibilità di rottura delle pale e/o delle parti delle pale è da ritenersi evento altamente improbabile.

5.2. Schema di calcolo

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

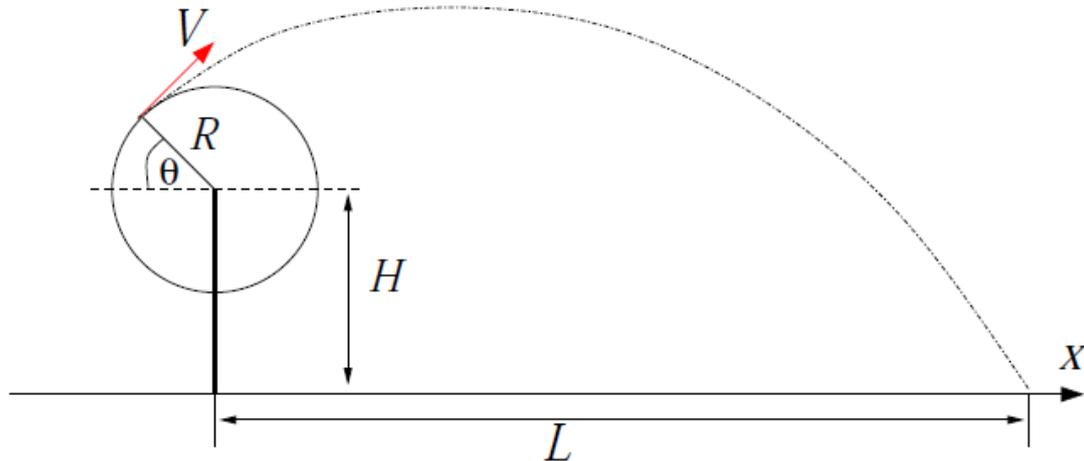


Figura 3 - Schema adottato per il calcolo della gittata

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

5.3. 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:

$$R_g = \frac{D}{2} - \frac{2}{3} \text{lunghezza frammento} = 71,7m$$

Essendo $D=150$ m e il frammento lungo 5 m.

5.4. 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 **$n = 12,6$ giri/min**) ed è pari a:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 1,32 \text{ rad / s}$$

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

$$V_g = \omega \cdot R_g = \frac{2\pi n}{60} \cdot R_g = 94,5 \frac{m}{s}$$

	<p align="center">RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE</p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 14 di 20</p>
---	--	--	---

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 **66 m/s**.

5.5. Calcolo di hG

Il raggio del baricentro del frammento è lungo 71,7 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:

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

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

5.6. Calcolo della gittata del frammento

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

La gittata massima del frammento di 5 m si ottiene per $\vartheta=55^\circ$ ed il risultato numerico è pari a **560,9 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.

Noto 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 gravosa, 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: $560,90 + 3,33 = \mathbf{564,23 \text{ m}}$

Angolo	Radiani	sen	coseno	Gittata (m)
0,00	0,00	0,00	1,00	-71,67
5,00	0,09	0,09	1,00	16,24
10,00	0,17	0,17	0,98	103,30
15,00	0,26	0,26	0,97	187,32
20,00	0,35	0,34	0,94	266,25
25,00	0,44	0,42	0,91	338,24
30,00	0,52	0,50	0,87	401,71
35,00	0,61	0,57	0,82	455,43
40,00	0,70	0,64	0,77	498,49
45,00	0,79	0,71	0,71	530,41
50,00	0,87	0,77	0,64	551,10
55,00	0,96	0,82	0,57	560,90
60,00	1,05	0,87	0,50	560,52
65,00	1,13	0,91	0,42	551,03
70,00	1,22	0,94	0,34	533,78
75,00	1,31	0,97	0,26	510,32
80,00	1,40	0,98	0,17	482,29
85,00	1,48	1,00	0,09	451,33
90,00	1,57	1,00	0,00	418,93
95,0	1,66	1,00	-0,09	386,35
100,0	1,75	0,98	-0,17	354,58
105,0	1,83	0,97	-0,26	324,32
110,0	1,92	0,94	-0,34	295,99
115,0	2,01	0,91	-0,42	269,80
120,0	2,09	0,87	-0,50	245,78
125,0	2,18	0,82	-0,57	223,83
130,0	2,27	0,77	-0,64	203,82
135,0	2,36	0,71	-0,71	185,57
140,0	2,44	0,64	-0,77	168,88
145,0	2,53	0,57	-0,82	153,56
150,0	2,62	0,50	-0,87	139,43
155,0	2,71	0,42	-0,91	126,34
160,0	2,79	0,34	-0,94	114,13
165,0	2,88	0,26	-0,97	102,67
170,0	2,97	0,17	-0,98	91,85
175,0	3,05	0,09	-1,00	81,55
180,0	3,14	0,00	-1,00	71,67

	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 16 di 20
---	--	---	--

Si riportano a seguire tutti i passaggi del calcolo della gittata massima ottenuto in corrispondenza del valore di angolo pari a 55°.

Come indicato al capitolo 3, 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:

$$\sin \vartheta = \sin 55 = 0,82$$

$$\cos \vartheta = \cos 55 = 0,57$$

$$\cos^2 \vartheta = 0,32$$

Si riporta il calcolo della Velocità

$$V_g = \omega \cdot R_g - \omega \cdot R_g \cdot F_r = 1,32 \cdot 71,67 - 1,32 \cdot 71,67 \cdot 0,30 = 66,16 \text{ m/s}$$

dove:

- La velocità angolare ω è pari a 12,6 giri/minuto ovvero 1,32 rad/sec
- 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 75 m – (2/3)*5 m = 71,7 m
- Fr è il fattore di resistenza assunto pari a 30%

da cui

$$V_g^2 = 4377 \text{ m}^2 / \text{s}^2$$

$$H = 125 \text{ m}$$

Sostituendo tutti i valori nella formula della gittata si ottiene:

$$G_{\max} = 560,9 \text{ m}$$

Il valore di 560,9 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 = 560,9 + 2/3*5 = 564,2 m

 TENPROJECT	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 17 di 20
---	--	---	--

Tutti gli aerogeneratori sono ubicati a distanze superiori ai valori ottenuti per la gittata massima della pala e del frammento rispetto alle strade provinciali e ai recettori individuati nell'area, ad eccezione degli aerogeneratori A05 e A06.

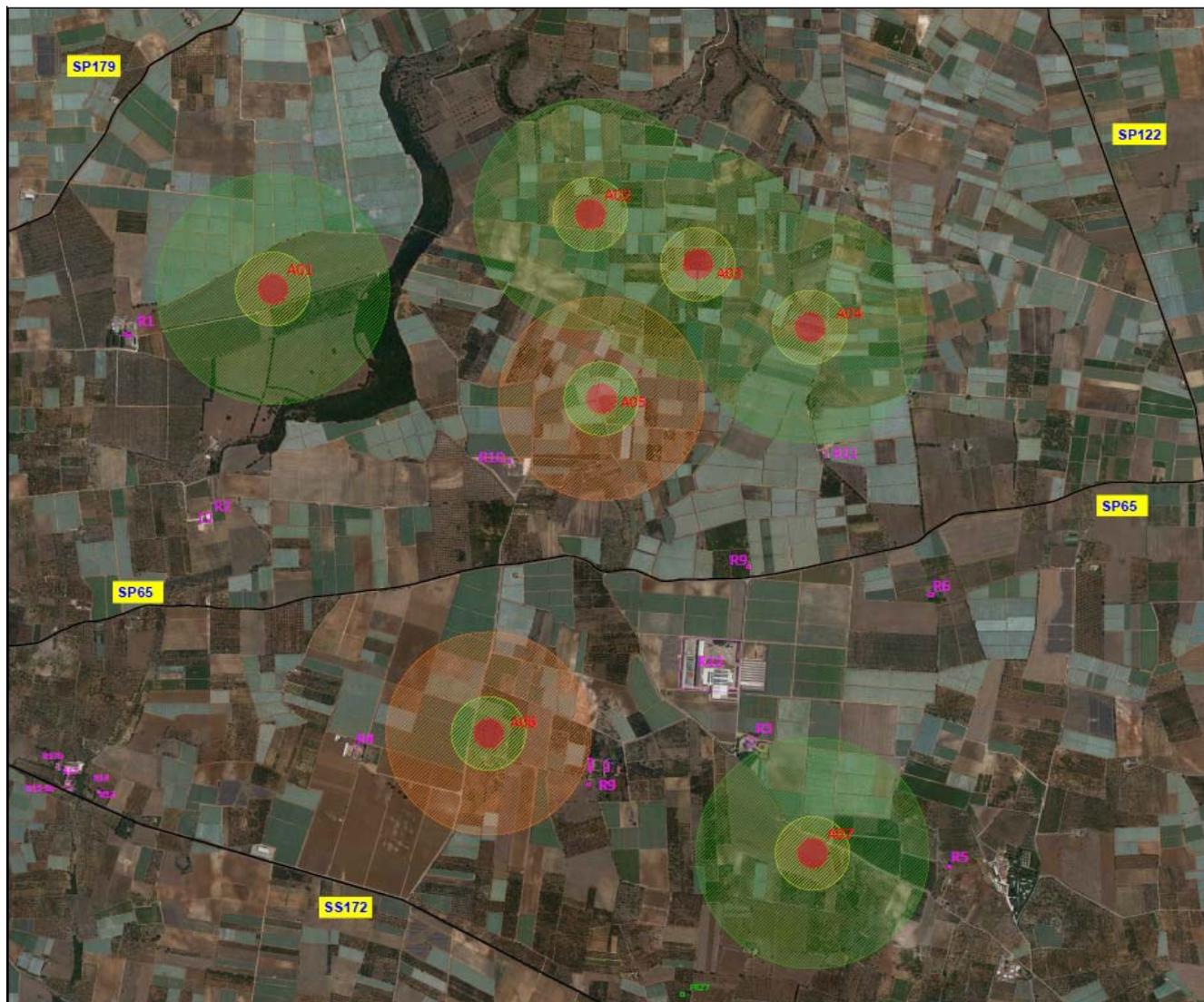
L'aerogeneratore A05 dista circa 533 m dal recettore R10 e l'aerogeneratore A06 dista circa 500 m dal recettore R9, distanze leggermente inferiori rispetto al valore ottenuto per la gittata del frammento pari a 564 m.

Anche se il distacco di un frammento di una pala, come più volte sottolineato, è un evento del tutto improbabile, si è scelto di ridurre il numero di giri della pala per i suddetti aerogeneratori (A05 e A06) impostandolo a $n = 11,6$ rpm. Con tale riduzione si ottiene che il **punto di massima caduta del frammento di 5 m risulta pari a 496 m.**

In tal modo tutti gli aerogeneratori risultano ubicati a distanze superiori a quelle della gittata rispetto ai recettori e alle strade provinciali e si è in sicurezza anche nel caso remoto del distacco di un frammento di pala.

6. APPLICAZIONE DELLO STUDIO AL PROGETTO IN ESAME

Nel caso dell'impianto eolico in esame si prevede la realizzazione di 7 aerogeneratori V150 con altezza mozzo di 125 metri. L'immagine a seguire mostra come gli aerogeneratori siano ubicati a distanze superiori a quelle della gittata rispetto ai recettori e alle strade provinciali presenti nell'area.



Legenda

-  Aerogeneratori di progetto
-  Buffer 181 m dagli aerogeneratori di progetto - punto di caduta più lontano nel caso di rottura al mozzo
-  Buffer 564 m dagli aerogeneratori di progetto - punto di caduta più lontano nel caso di rottura di un frammento della lunghezza di 5m
-  Buffer 496 m dagli aerogeneratori di progetto - punto di caduta più lontano nel caso di rottura di un frammento della lunghezza di 5m con numero di giri ridotto a n=11.6
-  Luoghi adibiti a permanenza della popolazione superiore a 4 ore al giorno o strutture accattate come "abitazioni" non abitate o stabilmente abitate
-  Strade Provinciali o Statati

Figura 4: Distanze minime degli aerogeneratori dalle strade e dai recettori

	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/12/2021 20/12/2021 00 19 di 20
---	--	---	---

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 **181 metri** e nel caso di rottura di un frammento della lunghezza di 5m è pari a **564,2 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.

Le distanze minime degli aerogeneratori di progetto, ad eccezione degli aerogeneratori A05 e A06, dalle strade provinciali e statali e dai recettori sono maggiori dei valori di gittata nel caso di rottura al mozzo e nel caso di distacco di un frammento di pala della lunghezza di 5m.

*Per gli aerogeneratori A05 e A06 sarà ridotto il numero di giri della pala e sarà impostato pari a 11,6 rpm. In tal modo per tali aerogeneratori il punto di caduta più lontano nel caso di rottura di un frammento della lunghezza di 5m è pari a **496 metri**, valore inferiore alle distanze dai recettori.*

Si conclude quindi che nell'ipotesi remota di rottura di una pala di un aerogeneratore si è in sicurezza.

Si ribadisce che il calcolo della gittata effettuato si basa su un modello teorico. Diversi studi, come quello Vestas e quello dell'ente certificatore tedesco DEWI, hanno approfondito la tematica giungendo a 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 spesso richiesto dall'ARPA Puglia, 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.

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

 TENPROJECT	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	1478-PD_A_SIA10.CG.01_REL_r00 11/122021 20/12/2021 00 20 di 20
---	--	---	--

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.

Si conclude, quindi, che il progetto di impianto eolico, proposto dalla società Repower nei comuni di Rutigliano (BA), Turi (BA) e Casamassima (BA) in località "Parco San Nicola" e "Villa Abbado", costituito da 7 aerogeneratori del tipo V150 con altezza al mozzo 125 m di potenza nominale pari a 6 MW, non pone problemi alla pubblica sicurezza nell'ipotesi remota di rottura di una pala nel punto di serraggio al mozzo e nel caso di distacco di un frammento di pala della lunghezza di 5m.