

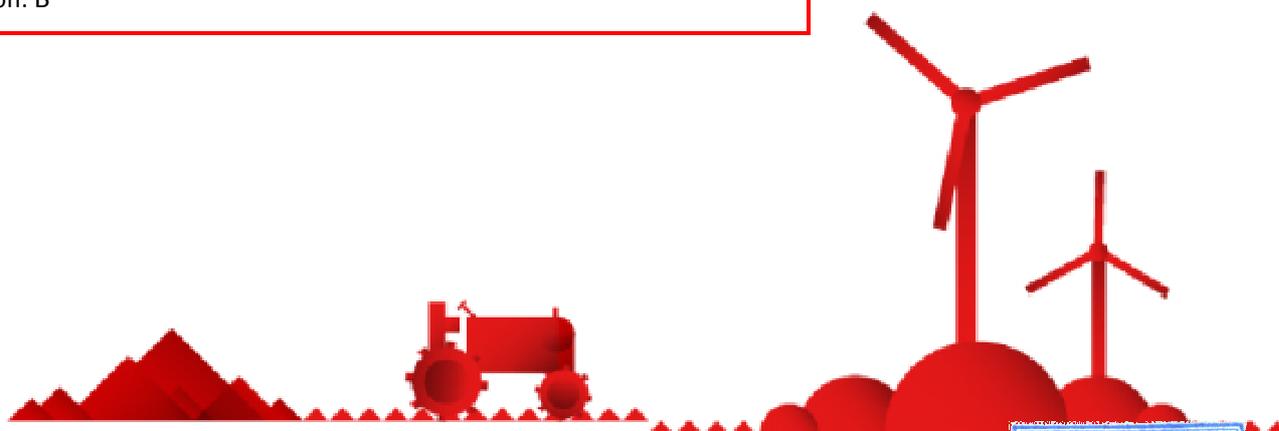
PARCO EOLICO "ROSAMARINA"

A.7 - Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti

Lavello (Potenza)

Settembre 2019

Version: B



EDP Renewables Italia Holding S.r.l.

Via Lepetit 8/10

20124 - Milano



MARGIOTTA ASSOCIATI

Via Vaccaro n.37

85100 Potenza

P.IVA: 01108480763

Tel: 0971/37512

	Progetto per la costruzione di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica con potenza di 37.1 MW e opere di connessione alla rete Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti	Settembre 2019
--	--	----------------

INDICE

1. GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	3
1.1. Calcolo della gittata massima	5

	Progetto per la costruzione di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica con potenza di 37.1 MW e opere di connessione alla rete Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti	Settembre 2019
--	--	----------------

1. GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

La tecnologia costruttiva degli aerogeneratori è alquanto sofisticata e di chiara derivazione aeronautica, per cui, la valutazione della gittata massima degli elementi di un aerogeneratore, in caso di rottura accidentale, comporta lo sviluppo di modelli di calcolo articolati e complessi.

I modelli teorici che meglio possono caratterizzare il moto nello spazio dei frammenti di pala o dell'intera pala possono essere ricondotti ai casi seguenti:

1. Primo caso - traiettoria a giavellotto con minore resistenza aerodinamica:

calcolo della gittata massima del generico frammento di ala, in assenza di moto rotazionale intorno ad un asse qualsiasi, con traiettoria del frammento complanare al rotore.

2. Secondo caso - traiettoria a giavellotto con maggiore resistenza aerodinamica:

calcolo della gittata massima del generico frammento di ala, sempre in assenza di moto rotazionale, intorno ad un asse qualsiasi, con traiettoria complanare al rotore e frammento ortogonale rispetto al piano del rotore.

3. Terzo caso - calcolo della gittata massima in presenza di moti di rotazione intorno a ciascuno dei tre assi principali del frammento stesso. In caso di rottura, infatti, per il principio di conservazione del momento angolare, il generico spezzone di pala tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano; inoltre, a causa delle diverse pressioni cinetiche esercitate dal vento, lo spezzone di pala tende anche a ruotare intorno a ciascuno dei due assi principali appartenenti al proprio piano.

Le condizioni prese in considerazione nel 3° caso, permettono senza dubbio un calcolo più preciso e maggiormente corrispondente al reale moto di una pala staccatasi dal rotore per cause accidentali e forniscono, sperimentalmente, un valore di gittata di circa il 20% in meno di quella fornita dal caso 1.

Come già accennato precedentemente, la risoluzione del 3° caso è però più complessa e richiede la conoscenza di alcune caratteristiche degli aerogeneratori, non sempre fornite dai produttori, poiché oggetto di brevetto.

Si è deciso, pertanto, di utilizzare il 1° caso, di facile soluzione e che fornisce un risultato maggiorato di circa il 20%, garantendo così un ulteriore margine di sicurezza.

Geometria del problema e calcolo della gittata (1° caso)

Le equazioni del moto di un punto materiale soggetto solo alla forza di gravità sono:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= 0 \\ \ddot{y} &= -g\end{aligned}$$

Dove $g=9.82 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità. La legge del moto che costituisce soluzione di queste equazioni è:

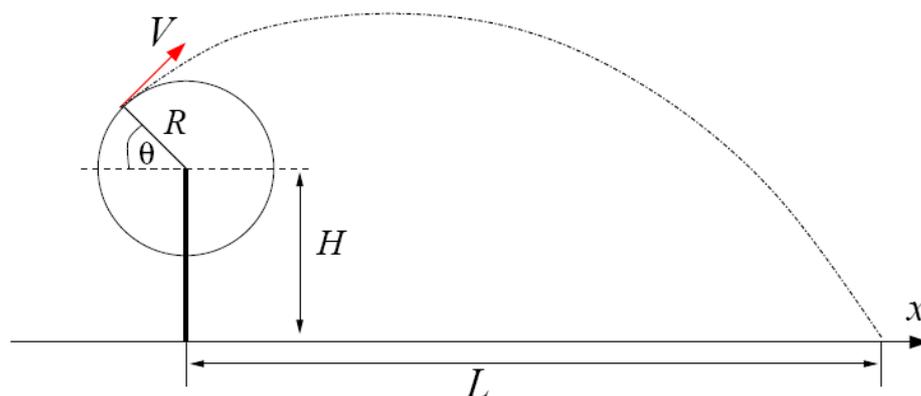
$$\begin{aligned}x(t) &= x_0 + v_x t \\ y(t) &= y_0 + v_y t - \frac{1}{2}gt^2\end{aligned}$$

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 :

$$T = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g}\sqrt{v_y^2 + 2y_0g}$$

In cui è stata scartata la soluzione corrispondente a tempi negativi.

Geometria del problema e calcolo della gittata



La posizione e la velocità iniziale sono determinate dall'angolo θ e dalla velocità iniziale V del frammento di pala al momento del distacco. Esse sono legate alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:



$$\begin{aligned}x_0 &= -R \cos(\theta) \\y_0 &= H + R \sin(\theta) \\v_x &= V \sin(\theta) \\v_y &= V \cos(\theta)\end{aligned}$$

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

$$L = x(T)$$

Sostituendo l'espressione per T ricavato sopra, si ricava la gittata L in funzione di V e di θ :

$$L = \frac{V \sin(\theta)}{g} \left[V \cos(\theta) + \sqrt{V^2 \cos^2(\theta) + 2(H + R \sin(\theta))g} \right] - R \cos(\theta)$$

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

1.1. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

Come già precedentemente indicato, il calcolo della gittata massima richiede la conoscenza dei valori H (altezza del mozzo), R (distanza dal mozzo del baricentro del frammento staccatosi dal rotore) e V (velocità di distacco del frammento di pala).

Per la tipologia di aerogeneratore scelto per il parco eolico Rosamarina, i valori di H ed R sono rispettivamente $H=121$ m ed $R=79$ m, e per il calcolo della velocità di distacco del frammento di pala si ricorre alla seguente formula:

$$V = \frac{2 \times \pi \times R \times rpm}{60}$$

Il massimo numero di giri per minuto che l'aerogeneratore compie è pari 9,8, quindi supponendo che la rottura della pala avvenga vicino al mozzo e considerando $R=26,33$ m (lunghezza pala/3), si ottiene una velocità di distacco di circa 27,01 m/s nel baricentro della pala.

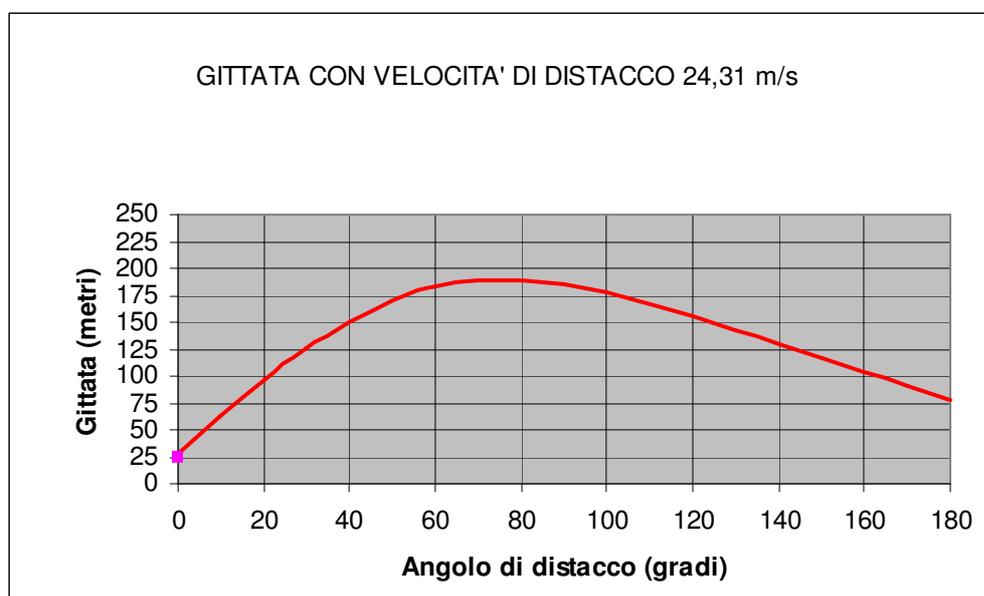
Tenendo conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza, il valore della velocità del baricentro della pala può essere ridotto del 20%, per cui il valore reale da considerare è 21,61 m/s.



Il calcolo della gittata è stato eseguito considerando valori crescenti dell'angolo Θ da 0° fino a 180° a cui è stato aggiunto.

A vantaggio di sicurezza, è stata inoltre considerata l'ipotesi più svantaggiosa, ovvero quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più distante dal baricentro verso l'esterno, pertanto ai valori ottenuti sono stati aggiunti 52,66 m pari a 2/3 della lunghezza della pala come si evince dalla seguente tabella.

Angolo	Gittata massima	Gittata massima + distanza vertice pala
0	-24,31	28,35
10	10,02	62,68
20	43,35	96,01
30	73,46	126,12
50	117,64	170,30
60	130,10	182,76
70	136,18	188,84
80	136,55	189,21
90	132,25	184,91
100	124,41	177,07
110	114,12	166,78
120	102,30	154,96
130	89,63	142,29
140	76,58	129,24
150	63,45	116,11
160	50,35	103,01
170	37,32	89,98
180	24,31	76,97



	Progetto per la costruzione di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica con potenza di 37.1 MW e opere di connessione alla rete Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti	Settembre 2019
--	--	----------------

Nel grafico si propone la gittata massima nel caso in cui si distacchi l'intera pala dal mozzo con una velocità di 24,31 m/s, che costituisce la massima velocità raggiunta dal baricentro della pala allorquando il rotore compie 9,8 rivoluzioni per minuto.

Al valore della gittata massima calcolata, come precedentemente detto, a vantaggio di sicurezza è stata aggiunta la distanza del vertice della pala dal baricentro ottenendo una gittata complessiva di circa 189,21 m.

Il valore ricavato è sicuramente compatibile con quello degli studi forniti dalle ditte produttrici.

Si sottolinea che il valore precedentemente calcolato sovrastima quello reale della gittata massima; infatti, in caso di distacco, la presenza dell'aria genera delle forze di resistenza viscosa che agendo sulla superficie del frammento ne riducono tempo di volo e distanza percorsa.

Avendo ottenuto una lunghezza complessiva inferiore ai 190 m e considerando tutte le condizioni più gravose al momento dell'ipotetica rottura, come ad esempio :

- massimo numero di giri del rotore,
- inclinazione della pala corrispondente alla massima velocità,
- esclusione degli effetti dovuti alla resistenza dell'aria che la pala incontra durante la sua traiettoria,

Si conclude che l'ubicazione prescelta per i 7 aerogeneratori del Parco Eolico Rosamarina di Lavello, con distanza superiore ai 400 m dalle abitazioni e superiore ai 200 dalle strade statali, provinciali e comunali, garantisce, in caso di rottura accidentale, che non si possano determinare condizioni di pericolo per cose o persone.