



REGIONE BASILICATA
 PROVINCIA DI POTENZA
 COMUNE DI MONTEMILONE
 COMUNE DI VENOSA



AUTORIZZAZIONE UNICA ex. d.lgs. 387/03

Progetto Definitivo per la realizzazione del parco eolico "SERRA LONGA" e relative opere connesse nel comune di VENOSA e MONTEMILONE (Pz)

Titolo elaborato

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

Codice elaborato

COMMESSA	FASE	ELABORATO	REV.
F0375	A	R09	B

Riproduzione o consegna a terzi solo dietro specifica autorizzazione.

Scala

—

DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
Aprile 2022	Aggiornamento	MCP	GDS	GMA
Dicembre 2020	Prima emissione	FTR	GDS	GMA

Proponente

Crono Rinnovabili s.r.l.

Largo Augusto 3
 20122 Milano



Progettazione



F4 Ingegneria srl

Via Di Giura - Centro direzionale, 85100 Potenza
 Tel: +39 0971 1944797 - Fax: +39 0971 55452
 www.f4ingegneria.it - f4ingegneria@pec.it

Il Direttore Tecnico
 (ing. Giovanni DI SANTO)



Società certificata secondo la norma UNI-EN ISO 9001:2015 per l'erogazione di servizi di ingegneria nei settori: civile, idraulica, acustica, energia, ambiente (settore IAF: 34).





Sommario

1 Premessa	2
2 Geometria del problema e teoria di calcolo	3
3 Distacco pala intera	5
4 Calcolo della gittata – distacco frammento 10 m	7
5 Calcolo della gittata – distacco frammento 5 m	9
6 Conclusioni	10



1 Premessa

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.

Il calcolo della gittata massima sarà effettuato modellizzando, con opportune semplificazioni, il moto della pala o di un frammento di pala nell'aria considerando l'attrito viscoso o se si preferisce l'attrito dell'aria prodotto su di esso durante la caduta.

Si sottolinea fin d'ora che tutte le approssimazioni e semplificazioni proposte sono a vantaggio di sicurezza, ovvero producono risultati con approssimazione in eccesso della gittata massima in caso di rottura di elementi rotanti, poiché il calcolo sarà fondato su un modello puramente balistico.

La determinazione dell'equazione del moto nel caso di un distacco di un corpo dal rotore in movimento è molto complesso. È evidente però che si tratta di un moto rotazionale complesso in quanto il corpo, quando inizierà il suo moto libero, continuerà anche a ruotare per l'ineluttabile legge fisica di conservazione della quantità del moto. Quindi nel moto libero (dopo il distacco) una parte dell'energia cinetica posseduta dal corpo verrà dissipata nel moto rotazionale che finirà per generare turbolenze. Di queste dissipazioni non si terrà conto nel calcolo che pertanto sarà prudenziale.

Una volta che il corpo si sarà distaccato le forze inerziali agenti saranno la forza di gravità e le forze viscosive dovute alla resistenza prodotta dall'aria.

L'aerogeneratore preso come riferimento per la presente verifica e previsto in progetto è del tipo Vestas V162-5.6 MW-HH119.

La velocità del rotore sarà variabile in relazione all'intensità del vento, ad ogni modo il calcolo sarà effettuato con riferimento alla velocità massima di 11.5 giri/min. Il peso della singola pala è di 25.0 tonnellate. Tali dati sono direttamente forniti dal produttore (specifiche tecniche aerogeneratore).

2 Geometria del problema e teoria di calcolo

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 $g=9.81 \text{ m/s}^2$ 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.

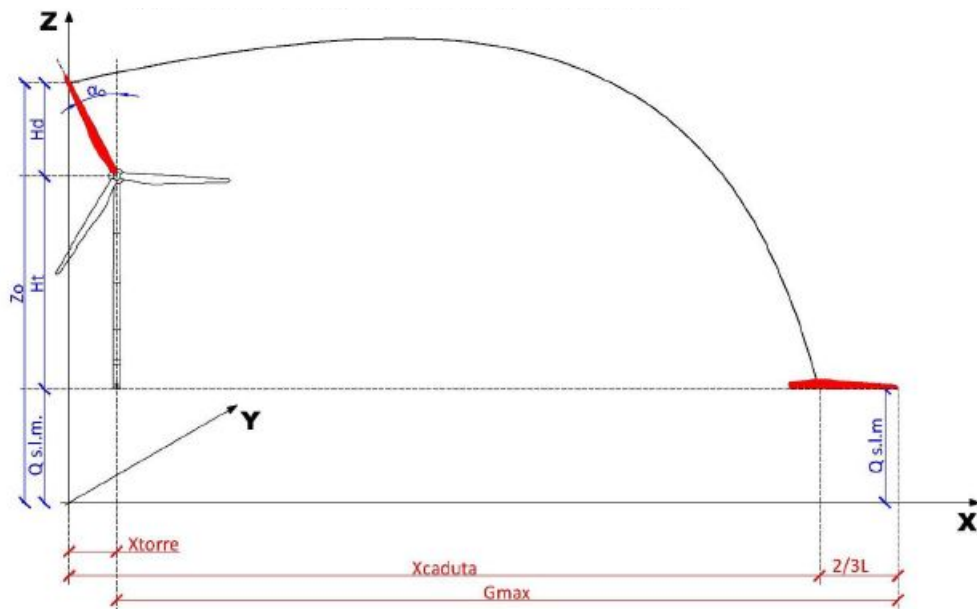


Figura 1: geometria del problema

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 .

3 Distacco pala intera

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).

Nel caso in esame, i valori di H ed R sono rispettivamente H=119 m ed R=81 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 11.5, quindi supponendo che la rottura della pala avvenga vicino al mozzo e considerando R=27 m (lunghezza pala/3), si ottiene una velocità di distacco di 32 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

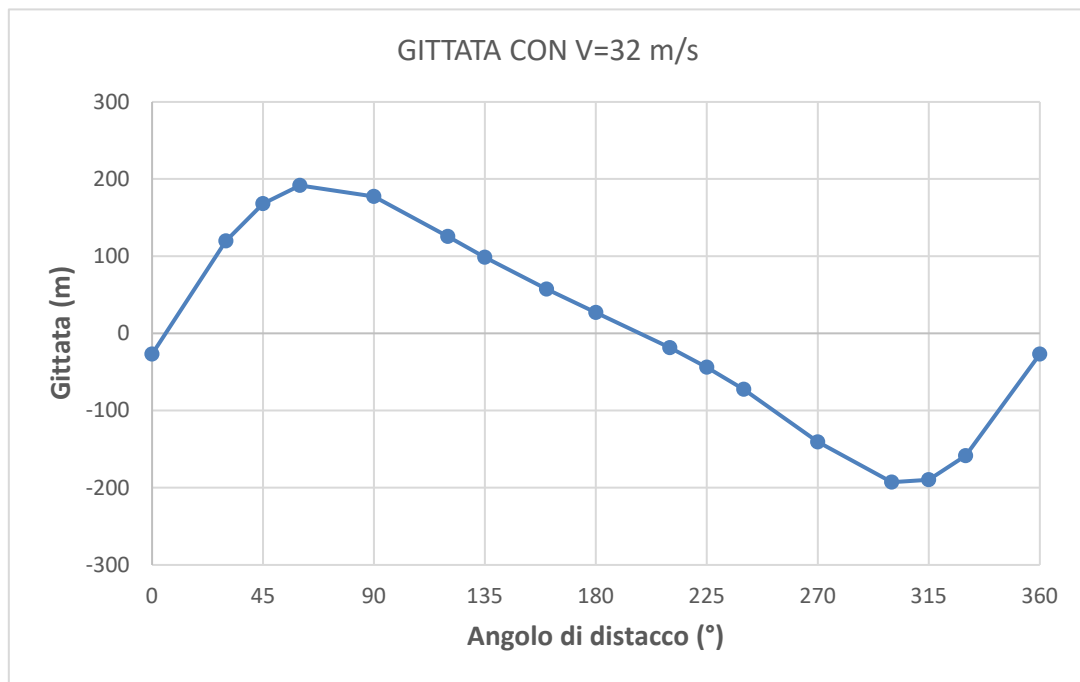


Figura 2: andamento della gittata in funzione dell'angolo e della velocità di distacco

Nel grafico si propone la gittata massima nel caso in cui si distacchi l'intera pala dal mozzo con una velocità di 32 m/s, che costituisce la massima velocità raggiunta dal baricentro della pala allorquando il rotore compie 11.5 rivoluzioni per minuto.

La gittata massima è di circa 192 m. In via cautelativa si aggiunge la lunghezza pari a 2/3 di quella della singola pala (54m) per arrivare ad una gittata complessiva di **246m**.

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 la presenza dell'aria genera delle forze di resistenza viscosa che agendo sulla superficie del frammento ne riducono tempo di volo e distanza.



A questa azione vanno aggiunte le forze aerodinamiche di portanza che possono innescarsi sul frammento di pala in virtù del profilo aerodinamico secondo il quale vengono modellate le sezioni trasversali della pala stessa; tale portanza potrebbe addirittura prolungare il volo e allungare la distanza percorsa.

Questa possibilità è correlata, tra l'altro, al rollio, all'imbardata ed all'impennarsi della pala durante il volo. L'azione della portanza può essere ricondotta e schematizzata nei calcoli con una riduzione percentuale della forza peso.

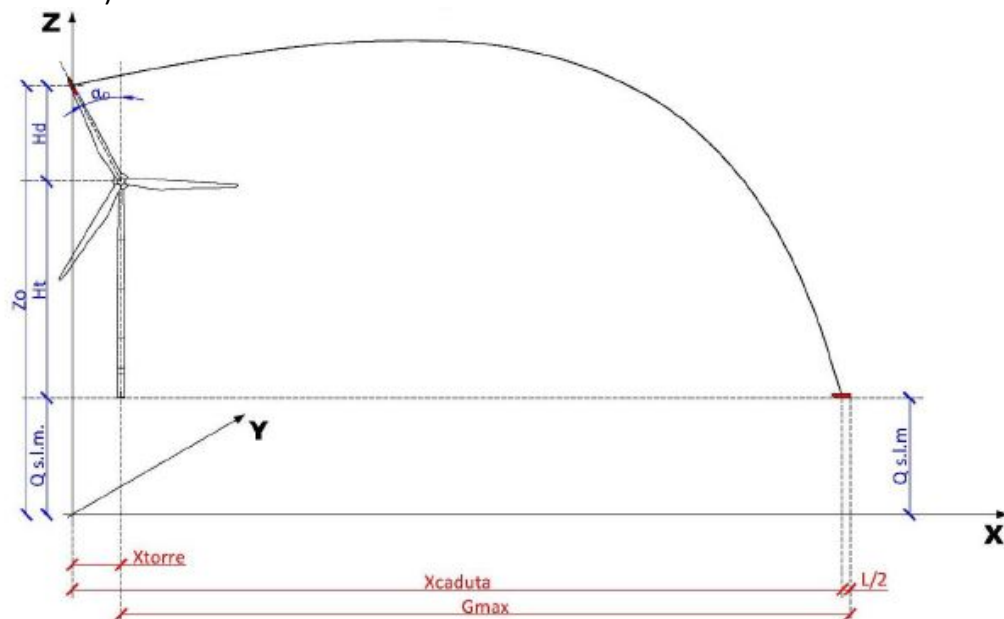


4 Calcolo della gittata – distacco frammento 10 m

Come detto in precedenza, il distacco di un frammento di pala è da considerarsi un evento pressoché impossibile di seguito si riporta il valore della gittata massima come soluzione dell'equazione differenziale richiamata nel paragrafo precedente, nel caso di un frammento di lunghezza pari a 10 m.

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

- $M = 926$ kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo
- Altezza mozzo $H_{hub} = 165$ m, diametro rotore 162 m, lunghezza pala 81 m, lunghezza frammento 10 m, velocità di rotazione 11.5 g/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore).
- La posizione del baricentro del frammento a 1/2 della sua lunghezza.
- $C_d = 1$, sulla base di dati riportati in letteratura
- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, si assume pari a 15 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 α_0 a cui avviene il distacco. Nel caso in esame il risultato è stato $\alpha_0 = 9^\circ$.
- Si è considerata la velocità massima del vento di 25 m/s a cui funziona l'aerogeneratore. Oltre questa velocità le pale vanno in stallo e non ruotano. La velocità del vento determina una componente del moto che è perpendicolare al piano di rotazione del rotore.
- Densità dell'aria $\rho = 0.898$, 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 $G_{Max} = 274,01 \text{ m} + (L/2 = 5\text{m}) = 279.01\text{m}$ con tempo di permanenza in volo di 10.87 secondi circa. Nel grafico la traiettoria del moto che, ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

5 Calcolo della gittata – distacco frammento 5 m

Come detto in precedenza, il distacco di un frammento di pala è da considerarsi un evento pressoché impossibile di seguito si riporta il valore della gittata massima come soluzione dell'equazione differenziale richiamata nel paragrafo precedente, nel caso di un frammento di lunghezza pari a 5 m.

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

- **M**= 463 kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo
- Altezza mozzo **H_{hub}**= 165 m, diametro rotore 162 m, lunghezza pala 81 m, lunghezza frammento 5 m, velocità di rotazione 11.5 g/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore).
- La posizione del baricentro del frammento a 1/2 della sua lunghezza.
- **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 10 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 α_0 a cui avviene il distacco. Nel caso in esame il risultato è stato $\alpha_0 = 10^\circ$.
- Si è considerata la velocità massima del vento di 25 m/s a cui funziona l'aerogeneratore. Oltre questa velocità le pale vanno in stallo e non ruotano. La velocità del vento determina una componente del moto che è perpendicolare al piano di rotazione del rotore.
- Densità dell'aria $\rho = 0.898$, 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} = 291,87 + (L/2=2.5m) = 294.37 m** con tempo di permanenza in volo di 10.85 secondi circa. Nel grafico la traiettoria del moto che, ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

In base ai risultati ottenuti, risolvendo le equazioni del modello per tre casistiche specifiche, la gittata massima si raggiunge per un frammento di lunghezza pari a 5 m.

In base ai risultati si può evincere che:

- Nel caso dell'intera pala il notevole peso incide notevolmente sulla lunghezza della traiettoria, oltre che sul tempo di volo.
- 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. Il caso peggiore è dato dal frammento di lunghezza pari a 5 m per il quale la gittata massima è di 279.01m.
- Anche nel caso peggiore la gittata si mantiene al di sotto dei 300 m.



6 Conclusioni

In base ai risultati ottenuti, risolvendo le equazioni del modello per tre casistiche specifiche, la gittata massima si raggiunge per un frammento di lunghezza pari a 5 m.

In base ai risultati si può evincere che:

- Nel caso dell'intera pala il notevole peso incide notevolmente sulla lunghezza della traiettoria, oltre che sul tempo di volo.
- 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. Il caso peggiore è dato dal frammento di lunghezza pari a 5 m per il quale la gittata massima è di 294,37 m.
- Anche nel caso peggiore la gittata si mantiene al di sotto dei 300 m.

Si conclude che l'ubicazione prescelta per gli aerogeneratori del Parco Eolico in oggetto, garantisce, in caso di rottura accidentale, che non si possano determinare condizioni di pericolo per cose o persone.