



REGIONE BASILICATA
 PROVINCIA DI POTENZA
 COMUNI DI VENOSA E MONTEMILONE



AUTORIZZAZIONE UNICA EX. D. LGS. 387/03

Progetto Definitivo Parco Eolico "Tre mani"

Titolo elaborato

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

Codice elaborato

COMMESSA	FASE	ELABORATO	REV.
F0359	B	R05	B

Riproduzione o consegna a terzi solo dietro specifica autorizzazione.

Scala

—

DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
Luglio 2021	emissione per rettifica calcoli gittata	GDS	FMO	GDS
Agosto 2020	Prima emissione	GDS	FMO	GDS

Proponente



GR VALUE DEVELOPMENT S.r.l.

C.so Venezia, 37 - 20121 Milano

Tel: +39 02 50043159

www.grvalue.com - grvaluedevelopment@pec.it

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 Calcolo della gittata massima	5
4 Conclusioni	7
Allegato – Dettagli dei calcoli effettuati	8



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.

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° 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° 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° 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.

Pertanto si è deciso 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.

L'aerogeneratore previsto in progetto è fornito dalla società Vestas ed è del tipo V150-5.6MW-HH125.

La presente relazione è stata rimesa in revisione "B" poiché, a causa di un mero errore materiale, nella versione originaria il calcolo si basava su un valore di rotazione delle pale superiore a quello dichiarato dalla casa produttrice.

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.

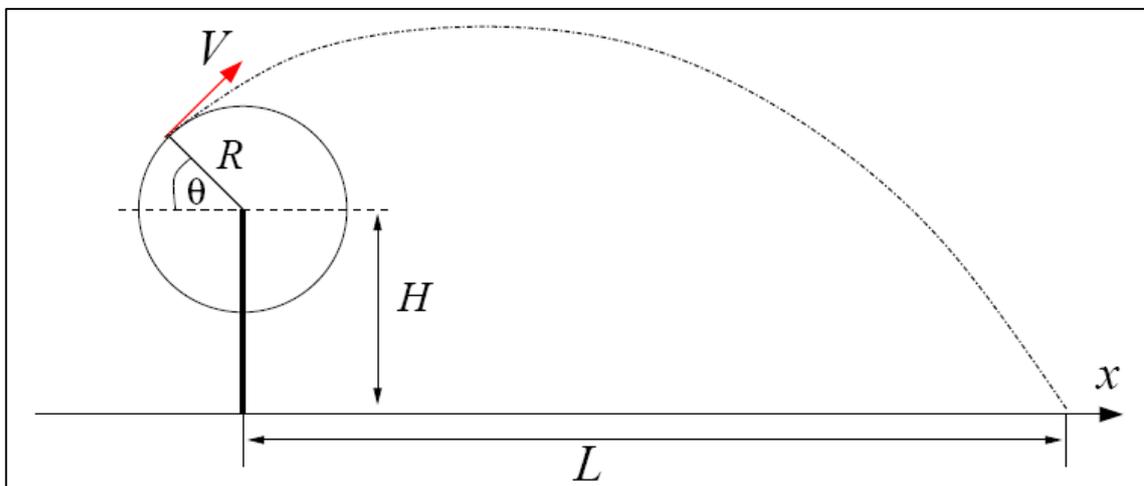


Figura 1: geometria del problema

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 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).

Nel caso in esame, i valori di H ed R sono rispettivamente H=125 m ed R=75 m, e per il calcolo della velocità di distacco del frammento di pala si ricorre alla seguente formula:

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

RESTRICTED

Document no.: 0081-5017 V01
 Document owner: Platform Management
 Type: T05 - General Description

General Description EnVentus™ 5MW
 Mechanical Design

Date: 2019-01-24
 Confidential
 Page 6 of 35

Original Instruction: T05 0081-5017 VER 01

3 Mechanical Design

3.1 Rotor

The wind turbine is equipped with a rotor consisting of three blades and a hub. The blades are controlled by the microprocessor pitch control system OptiTip®. Based on the prevailing wind conditions, the blades are continuously positioned to optimise the pitch angle.

Rotor	V150	V162
Diameter	150 m	162 m
Swept Area	17671 m ²	20611 m ²
Speed, Dynamic Operation Range	4.9 - 12.6 rpm	4.3 -12.1 rpm
Rotational Direction	Clockwise (front view)	
Orientation	Upwind	
Tilt	6°	
Hub Coning	6°	
No. of Blades	3	
Aerodynamic Brakes	Full feathering	

Table 3-1: Rotor data

Figura 2: stralcio della scheda tecnica dell'aerogeneratore tipo utilizzato per il progetto

Il massimo numero di giri per minuto che l'aerogeneratore compie è pari a 12.6, quindi supponendo che la rottura della pala avvenga vicino al mozzo e considerando R=25 m (lunghezza pala/3), si ottiene una velocità di distacco di circa 33 m/s nel baricentro della pala.

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

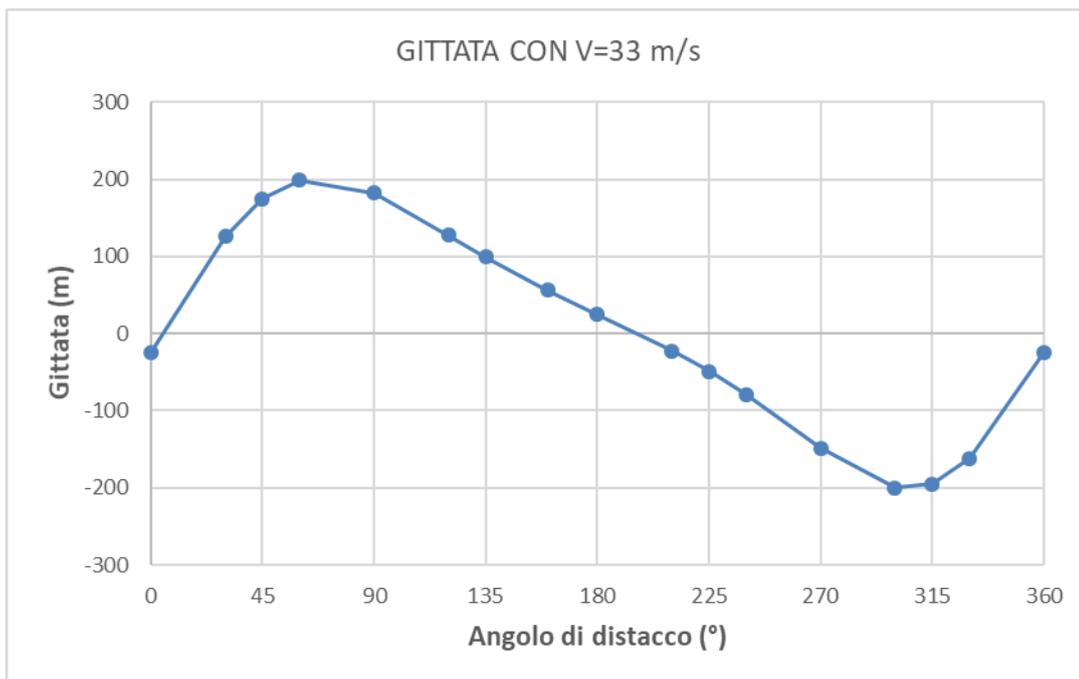


Figura 3: andamento della gittata in funzione dell'angolo e della velocità di distacco

Nel grafico si propone la gittata massima nel caso in cui si distacchi l'intera pala dal mozzo con una velocità di 33 m/s, che costituisce la massima velocità raggiunta dal baricentro della pala allorquando il rotore compie 12.6 rivoluzioni per minuto.

La gittata massima è di circa 199 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 la presenza dell'aria genera delle forze di resistenza viscoso 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 Conclusioni

Avendo ottenuto la lunghezza di 199 m e considerando tutte le condizioni più gravose al momento dell'ipotetica rottura (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 gli aerogeneratori del Parco Eolico in oggetto, con distanza superiore ai 300 m dalle abitazioni e dalle strade con volumi di traffico non trascurabili, garantisce, in caso di rottura accidentale, che non si possano determinare condizioni di pericolo per cose o persone.



Allegato – Dettagli dei calcoli effettuati

Input
Output

H	125.00	m	altezza mozzo
R	75.00	m	lunghezza pala
n. giri max	12.60	rpm	
V	33	m/s	velocità di distacco
teta	60	°	angolo di distacco
teta	1.0472	rad	
L	199	m	gittata max

teta (°)	teta (rad)	SEN teta	COS teta	V (m/s)	R/3 (m)	H (m)	g (m/s ²)	L (m)
0	0.00	0.00	1.00	32.97	25.00	125.00	9.81	-25.00
30	0.52	0.50	0.87	32.97	25.00	125.00	9.81	125.93
45	0.79	0.71	0.71	32.97	25.00	125.00	9.81	175.13
60	1.05	0.87	0.50	32.97	25.00	125.00	9.81	198.81
90	1.57	1.00	0.00	32.97	25.00	125.00	9.81	182.32
120	2.09	0.87	-0.50	32.97	25.00	125.00	9.81	127.85
135	2.36	0.71	-0.71	32.97	25.00	125.00	9.81	99.68
160	2.79	0.34	-0.94	32.97	25.00	125.00	9.81	56.66
180	3.14	0.00	-1.00	32.97	25.00	125.00	9.81	25.00
210	3.67	-0.50	-0.87	32.97	25.00	125.00	9.81	-22.75
225	3.93	-0.71	-0.71	32.97	25.00	125.00	9.81	-49.24
240	4.19	-0.87	-0.50	32.97	25.00	125.00	9.81	-79.09
270	4.71	-1.00	0.00	32.97	25.00	125.00	9.81	-148.87
300	5.24	-0.87	0.50	32.97	25.00	125.00	9.81	-200.05
315	5.50	-0.71	0.71	32.97	25.00	125.00	9.81	-195.40
330	5.76	-0.50	0.87	32.97	25.00	125.00	9.81	-162.02
360	6.28	0.00	1.00	32.97	25.00	125.00	9.81	-25.00