

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO E  
DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RTN  
POTENZA NOMINALE 56 MW

REGIONE  
PUGLIA



PROVINCIA di  
BRINDISI



COMUNE di  
FRANCAVILLA FONTANA



Località "Masseria Vizzo"

Scala:

Formato Stampa:

-

A4

PROGETTO DEFINITIVO

ELABORATO

PR17

*Effetto Rottura Organi Rotanti*

Progettazione:



**R.S.V. Design Studio S.r.l.**  
Piazza Carmine, 5 | 84077 Torre Orsaia (SA)  
P.IVA 05885970656  
Tel./fax: +39 0974 985490 | e-mail: info@rsv-ds.it

Committenza:



ITW FRANCAVILLA S.r.l.  
Via del Gallitello, 89  
85100 Potenza (PZ)  
P.IVA 02082790763

Responsabili Progetto:

Ing. Vassalli Quirino



Ing. Speranza Carmine Antonio



Catalogazione Elaborato

ITW\_FVF\_PR17\_RELAZIONE EFFETTO ROTTURA ORGANI ROTANTI\_REV01.pdf

ITW\_FVF\_PR17\_RELAZIONE EFFETTO ROTTURA ORGANI ROTANTI\_REV01.doc

Data	Motivo della revisione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:
Ottobre 2022	Richiesta di Integrazione MiTE prot. 0007145 del 28/09/2022	LS	QV/AS	RSV

## SOMMARIO

---

<b>SOMMARIO</b>	<b>1</b>
<b>1. PREMESSA</b>	<b>2</b>
<b>2. INTRODUZIONE</b>	<b>2</b>
<b>3. STUDIO DELLA GITTATA DELLA PALA DELL'AEROGENERATORE</b>	<b>3</b>
<b>3.1 IPOTESI DI CALCOLO</b>	<b>3</b>
3.1.1 SPECIFICHE TECNICHE DELL'AEROGENERATORE	3
3.1.2 IPOTESI DI DISTACCO E CONSIDERAZIONI CAUTELATIVE	3
<b>3.2 CALCOLO DELLA GITTATA</b>	<b>4</b>
3.2.1 STUDIO DEL MOTO DEL PROIETTILE MEDIANTE LE EQUAZIONI DELLA CINEMATICA	5
3.2.2 GITTATA MASSIMA	6
3.2.3 CALCOLO DELLA VELOCITÀ PERIFERICA	8
3.2.4 CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA	9
3.2.5 IPOTESI DI DISTACCO FRAMMENTI E CALCOLO DELLA GITTATA	10
3.2.6 CONCLUSIONI	11

## 1. PREMESSA

---

Con riferimento alla disciplina del procedimento di cui all'articolo 12 del decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387 e dell'art.6 del decreto legislativo 3 marzo 2011, n.28 per il rilascio dell'autorizzazione alla costruzione e all'esercizio di impianti di produzione di elettricità da fonti rinnovabili e linee guida tecniche per la progettazione gli impianti stessi, si rende necessario, per gli impianti eolici, la valutazione della gittata massima degli elementi di un aerogeneratore, in caso di rottura accidentale, ed in particolar modo l'analisi si concentra sul distacco dell'elemento costruttivo "pala" dell'aerogeneratore in caso di improvviso ed accidentale distacco dal rotore dell'aerogeneratore stesso.

Il presente documento riporta lo studio effettuato per la valutazione della gittata massima della pala, con riferimento alla tecnologia utilizzata nel progetto di parco eolico previsto nel Comune di Francavilla Fontana (BR) alla località "Masseria Vizzo".

## 2. INTRODUZIONE

---

Lo studio viene eseguito utilizzando una metodologia di calcolo che abbia rigore scientifico e considerando tutti i possibili effetti meccanici ed aerodinamici che possono in qualche modo influenzare la distanza di gittata della pala.

Nel calcolo s'ipotizza, per ragioni cautelative, l'applicazione delle condizioni peggiori in cui si possa verificare il distacco della pala dell'aerogeneratore.

In particolare, a causa delle caratteristiche costruttive degli aerogeneratori, la pala che accidentalmente si distacca dal rotore viene messa in moto dalla forza centrifuga determinata dalla rotazione del rotore stesso, con una velocità iniziale  $V_0$  proporzionale alla velocità di rotazione del rotore.

In questa trattazione verranno analizzate essenzialmente situazioni critiche che riguardano il distacco della pala integra dall'aerogeneratore, quindi senza che essa si frammenti in porzioni di varie dimensioni. Questo tipo di approccio semplifica moderatamente il problema ma garantisce una buona verosimiglianza del calcolo, poiché non potendo prevedere la forma, né le dimensioni dei frammenti che potrebbero staccarsi dalla pala ogni ipotesi in merito potrebbe generare scenari non del tutto attendibili.

### 3. STUDIO DELLA GITTATA DELLA PALA DELL'AEROGENERATORE

Lo studio è stato condotto prendendo in esame le caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore e della pala previsti nel progetto di parco eolico cui fa riferimento il presente lavoro.

#### 3.1 IPOTESI DI CALCOLO

Di seguito sono elencate le caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore e della pala utilizzata nello studio, le ipotesi di funzionamento e le condizioni cautelative adottate.

##### 3.1.1 Specifiche tecniche dell'aerogeneratore

<u>ROTORE</u>	
Altezza mozzo	105 m
Diametro	150 m
Area spazzata	17'671 m <sup>2</sup>
Range velocità operativa di Funzionamento	4.9 - 12.6 rpm
Numero pale	3
Lunghezza pala	75 m
Posizione del baricentro	1/3 della sua lunghezza, a partire dalla radice
<u>CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO</u>	
Velocità di cut-in	3.0 m/s
Velocità di cut-out	25 m/s

##### 3.1.2 Ipotesi di distacco e considerazioni cautelative

Per mettersi nella condizione di gittata massima possibile, si assume che:

- IL DISTACCO DELLA PALA AVVENGA IN FASE DI ROTAZIONE DEL ROTORE QUANDO LA PALA PASSA NELLA METÀ SUPERIORE DEL PIANO DI ROTAZIONE, SOPRA IL MOZZO;
- SI SUPPONE CHE IL DISTACCO AVVENGA NELLE CONDIZIONI DI VELOCITÀ MASSIMA DI ROTAZIONE DEL ROTORE MAGGIORATO DEL 10%, E QUINDI PARI A 13.86 RPM;
- SI SUPPONE CHE IL VENTO PRESENTE ALL'ALTEZZA DELL'HUB SIA QUELLO CORRISPONDENTE ALLA VELOCITÀ DI ROTAZIONE NOMINALE, E QUINDI COMPRESO TRA 3 M/S E 25 M/S. TUTTAVIA, POICHÉ IL VENTO È ORTOGONALE AL PIANO DEL ROTORE E LA PALA VIENE GITTATA NEL PIANO STESSO, L'AZIONE MECCANICA DEL VENTO NON DOVREBBE AUMENTARE LA LUNGHEZZA DELLA

GITTATA. D'ALTRA PARTE LA PALA HA UN PROFILO ALARE, CHE PER AZIONE DEL VENTO E PER EFFETTO DELLA POSIZIONE DELLA PALA RISPETTO A QUESTO PUÒ ESSERE SIA PORTANTE (SOSTENENDO IN VOLO LA PALA), SIA DEPORTANTE (SPINGENDOLA VERSO IL BASSO). NELL'IPOTESI PEGGIORE SI SUPPONE IN VIA CAUTELATIVA CHE L'AZIONE DEL VENTO PROLUNghi IL TEMPO DI VOLO DELLA PALA STESSA DEL 20%;

- GLI EFFETTI VISCOSI DELL'ARIA DETERMINANO UNA RESISTENZA AERODINAMICA DELLA STESSA NEL MOTO IN ARIA, CHE TENDONO A FRENARE LA PALA STESSA E A RIDURRE LA LUNGHEZZA DI GITTATA. PER CAUTELA NEL CALCOLO SONO STATI TRASCURATI GLI EFFETTI VISCOSI FRENANTI DELL'ARIA;
- NON SONO STATI CONSIDERATI MOTI ROTATORI DELLA PALA CHE POSSONO SOPRAGGIUNGERE IN VIRTÙ DELLA CONSERVAZIONE DEL MOMENTO DELLA QUANTITÀ DI MOTO, POICHÉ QUESTA ULTERIORE ASSUNZIONE FA SÌ CHE IL CASO ESAMINATO SIA LA CONDIZIONE PEGGIORE IPOTIZZABILE.

### 3.2 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 trascurabili le forze ed il momento di resistenza dovute al mezzo in cui si svolge il moto (aria).

Nel caso notevole di un proiettile non puntiforme, le equazioni che governano il moto sono rispettivamente la prima e la seconda equazione della dinamica:

$$M \cdot g = Ma$$

$$I \, dw/dt = 0$$

Supponendo di concentrare tutto nel centro di massa, il momento della forza peso è nullo (avendo scelto G come polo dei momenti). Pertanto la seconda equazione ci dice che il corpo durante la traiettoria che percorre, gira indisturbato intorno al suo asse principale di inerzia. La soluzione del problema viene dalla risoluzione della prima equazione, ed

evidenza che la pala si muoverà con il moto di un proiettile puntiforme e, di conseguenza, ne compirà il caratteristico andamento parabolico.

Il moto di un proiettile si può pensare come la composizione di due moti: un 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, se è denso e poco esteso, o altrimenti dal suo centro di massa, 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. È interessante osservare che all'aumentare dell'angolo a formato con il terreno, la gittata del proiettile aumenta, presentando valore massimo per un angolo a pari a  $\pi/4$ ; ad ulteriori incrementi dell'angolo a il valore della gittata torna a diminuire presentando un valore nullo allorché il proiettile è lanciato verso l'alto con angolo pari a  $\pi$ .

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) utilizzeremo un sistema di riferimento cartesiano  $x - y$  in cui l'origine  $O$  degli assi del sistema coincida con il punto da cui il proiettile è stato lanciato.

### 3.2.1 Studio del moto del proiettile mediante le equazioni della cinematica

Considereremo 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.

Sceglieremo 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:

$$a_x = 0 \qquad a_y = -g$$

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  $\theta$  come in figura:

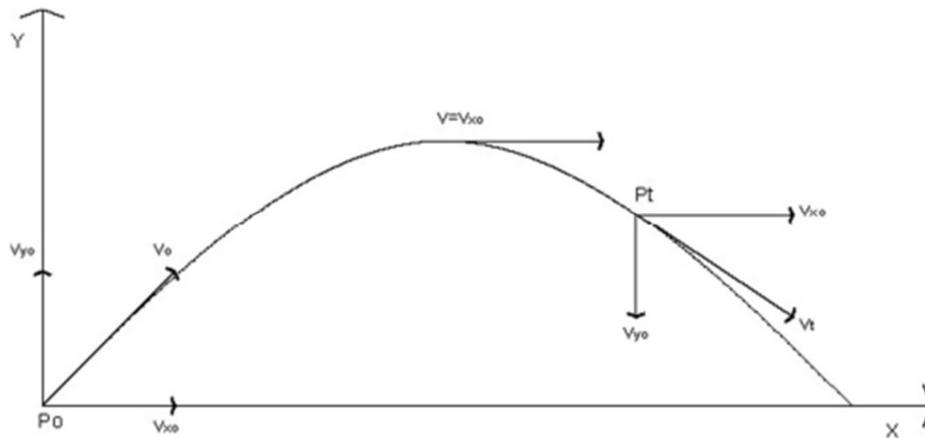


Figura 1 - Traiettoria di un grave in caduta

Ricordando che:

$$ax = 0$$

$$ay = g$$

(dove)  $g = -9.81 \text{ m/s}^2$

e considerando che:

Direzione x: il MOTO È RETTILINEO UNIFORME

Direzione y: il MOTO È UNIFORMEMENTE ACCELERATO

La velocità  $v_0$  ha componenti nelle due direzioni:

$$v_x = v_0 \cos \theta$$

$$v_y = v_0 \sin \theta$$

Da cui:

$$v_x = v_{x0}$$

$$x = x_0 + v_{x0} t$$

$$v_y = gt + v_{y0}$$

$$y = \frac{1}{2} gt^2 + v_{y0} t + y_0$$

### 3.2.2 Gittata massima

La gittata è la distanza percorsa dal proiettile in direzione x prima di toccare terra. Questo valore si trova imponendo che nella equazione:

$$y = \frac{1}{2} gt^2 + v_{y0} t + y_0$$

sia nullo  $y$  determinando così l'istante  $t$  in cui avviene il transito (e in questo caso l'impatto) alla quota  $y = 0$  sarà:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0 = 0$$

Nell'ipotesi semplificativa che  $y_0 = 0$  si ottiene:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t = 0$$

da cui le due soluzioni:

$$t_0 = 0$$

$$t_1 = \frac{2v_{y0}}{g} = -\frac{2v_0 \sin \theta}{g}$$

$t_0$  corrisponde all'istante di lancio del proiettile (abbiamo infatti ipotizzato per semplicità che  $y_0 = 0$ );

$t_1$  all'istante in cui il proiettile, avvenuto il lancio, tocca nuovamente terra.

Sostituendo quest'ultimo valore  $x = x_0 + vx_0t$  nell'equazione, descrittiva del moto lungo  $x$ , si ricaverà il valore della gittata:

$$x = x_0 - 2\frac{v^2_0}{g}$$

Ipotizzando per semplicità che

$$x_0 = 0$$

ed essendo

$$2\sin\theta\cos\theta = \sin 2\theta$$

si può riscrivere la equazione per il calcolo della gittata come:

$$x = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta$$

La gittata massima è così funzione del modulo della velocità iniziale, dell'ascissa e della quota iniziale di lancio (che in questo caso semplificato sono state considerate nulle), e di  $\theta$  angolo di inclinazione della gittata: in particolare essa sarà massima quando  $\sin 2\theta = 1$  cioè  $2\theta = \pi/2$  ossia  $\theta = \pi/4$ .

Nel caso in questione  $y_0$  non sarà uguale a zero, ma corrispondente alla quota del baricentro  $G$  del sistema ipotizzato rispetto alla quota del piano di campagna.

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  $r_g = 25 \text{ m}$  essendo il raggio di ciascuna pala uguale a **75 m**.

Di conseguenza l'altezza di lancio sarà uguale a:

$$y_0 = H_{\text{torre}} + Y_g$$

dove

$$Y_g = \frac{1}{3} r_g \cdot \sin 2\theta$$

Ciò implica che la soluzione di  $t$  sarà:

$$t = -\frac{v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4 \cdot \frac{1}{2} g y_0}}{g}$$

tale valore andrà sostituito nell'equazione descrittiva del moto lungo  $x$ , per trovare la gittata massima.

### 3.2.3 Calcolo della velocità periferica

La velocità angolare media  $\omega$  è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo. Chiamiamo con  $n$  il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare. Tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a  $2\pi$  radianti, per  $n$  giri avremo  $2\pi n$  radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare  $\omega$  al minuto del corpo in movimento.

Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

$$w = \frac{2\pi n}{60} \text{ rad/sec}$$

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  $2\pi n$  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 di 13.6 giri al minuto), corrisponde a:

$$V_g = w \cdot r_g = \frac{2\pi n}{60} r_g = 35.6 \text{ m/sec}$$

### 3.2.4 Calcolo della gittata massima

Quindi, nell'ipotesi di distacco di una pala nel punto di serraggio del mozzo, punto di maggiore sollecitazione a causa del collegamento, vengono considerate le seguenti ipotesi:

- il moto del sistema è considerato di tipo rigido non vincolato;
- si ritengono trascurabili le forze di resistenza dell'aria;
- le componenti dell'accelerazione saranno  $a_x = 0$ ,  $a_y = -g$ ;
- la velocità periferica  $v_0$  è uguale a **35.6 m/s**;
- Le coordinate del punto di partenza del corpo, non saranno  $(0,0)$  coincidenti con l'origine degli assi ma  $(0, H_G = H_{\text{torre}} + Y_g)$  ossia le coordinate del baricentro G di una pala.

La risoluzione dell'equazione descrittiva del moto, nelle suddette condizioni, sarà quindi:

$$Gittata_{max} = v_{x0} \frac{v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4 \cdot \frac{1}{2} g y_0}}{g}$$

Al valore di gittata massima andrà aggiunta la distanza  $X_g$  del baricentro rispetto all'asse della torre  $X_g = r_g \cdot \cos\theta$  e la distanza del vertice della pala considerato nelle condizioni più gravose, ovvero disposto nella parte più lontana dal baricentro, ossia a  **$X_g = 10.9 \text{ m}$** .

Nella tabella che segue sono indicati i valori più rappresentativi della gittata massima e della distanza totale dalla torre nel punto di caduta rispetto a valori di  $\theta$  corrispondenti a **0, 45, 90 e 64** gradi, quest'ultimo rappresenta l'angolo per il quale si ottiene il valore di gittata massima.

Angolo $\alpha$	0°	45°	64°	90°
n	13.60	13.60	13.60	13.60
L	75.00	75.00	75.00	75.00
H <sub>torre</sub>	105.00	105.00	105.00	105.00
v <sub>0</sub>	35.60	35.60	35.60	35.60
v <sub>x0</sub>	0.00	25.18	32.00	35.60
v <sub>y0</sub>	35.60	25.18	15.61	0.00
H <sub>g</sub>	105.00	122.68	127.47	130.00
D	150	150	150	150
r <sub>g</sub>	25.00	25.00	25.00	25.00
g	9.81	9.81	9.81	9.81
Gittata teorica	-25.00	188.45	210.85	183.30
X <sub>g</sub>	25.00	17.68	10.96	0.00
L <sub>g</sub>	50.00	50.00	50.00	50.00
Gittata Effettiva	25.00	238.45	260.85	233.30

### 3.2.5 Ipotesi di distacco frammenti e calcolo della gittata

Il calcolo di gittata nei casi di distacco di frammenti risulta di difficile computazione dal momento che la dimensione del pezzo di pala distaccato non può essere prevista con certezza. Pertanto, in questo caso si effettua una stima della gittata di frammenti di pale di dimensioni pari a 5 e 10 m.

Ipotesi di calcolo:

- attrito nullo;
- massima velocità della pala;
- nessuna energia spesa per il distacco del frammento;
- angolo di gittata massimo.

	V <sub>x0</sub>	Angolo $\alpha$	Gittata Effettiva
Frammento di 5 m	78.19	50	1167.72
Frammento di 10 m	75.63	51	1074.07

Si osservi come la velocità iniziale di un frammento di pala tende ad essere superiore a quella di un'intera pala perché il frammento ha una posizione radiale maggiore, l'angolo di rilascio è direttamente correlato all'azimut della pala, che è la posizione del rotore in un determinato momento. Quindi anche al momento della separazione, la pala o il frammento

hanno la stessa velocità angolare del rotore. In questo caso, i valori delle gittate sono assolutamente indicativi in quanto non è stato considerato alcun sistema di controllo e di sicurezza dell'aerogeneratore.

### 3.2.6 Conclusioni

In conclusione scegliendo il valore che rappresenta le condizioni più gravose ossia quello con un angolo di lancio  $\theta = 64^\circ$  e sommando la sua distanza orizzontale dal baricentro con la distanza del vertice della pala si ha che **la distanza massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale è di circa 260.85 m.**

Si tenga presente che tale valore nella realtà risulta inferiore, difatti è giusto considerare agire simultaneamente le condizioni peggiori di velocità del vento, velocità di rotazione e azione di portanza sul profilo alare dopo il distacco, ma le cause che porterebbero ad un eventuale distacco della pala o parte di essa sono rappresentate da un colpo di fulmine o da un urto accidentale di notevole intensità agente alla base della torre.

L'accadimento di tali fenomeni ha un valore di rischio molto basso, reso ancora più basso dal fattore di contemporaneità. Si tenga conto che tutte le turbine eoliche sono dotate di un complesso sistema parafulmine ma che per quanto riguarda l'urto non è pensabile potersi tutelare da un incidente, quale un velivolo o altro, che impatta sul rotore di una turbina o alla base della torre.