



REGIONE PUGLIA



PROVINCIA di FOGGIA



COMUNE di POGGIO IMPERIALE



Proponente	<b>IVPC Power 6 S.r.l.</b> Via Circumvallazione 108   83100 Avellino Tel. 0825.693711   Fax 0825.781472 P.IVA 02509050643 				
PROGETTAZIONE E COORDINAMENTO	 <b>STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA</b> MEZZINA dott. ing. Antonio Via T. Solis 128   71016 San Severo (FG) Tel. 0882.228072   Fax 0882.243651 e-mail: info@studiomezzina.net   				
Studio Paesaggistico e Ambientale	 <b>VEGA sas</b> LANDSCAPE ECOLOGY & URBAN PLANNING  <b>Arch. Antonio Demaio</b> Tel. 0881.756251   Fax 1784412324 E-Mail: sit.vega@gmail.com	Studio Idrologico-idraulico	<b>ARKE' Ingegneria S.r.l.</b> Via Imperatore Traiano, 4 - 70126 BARI Tel.   Fax. 080.2022423 E-Mail: l.fanelli@arkeingegneria.it		
Studio Archeologico	 <b>NOSTOI s.r.l. - Dott.ssa Maria Grazia Liseno</b> Tel. 0972.081259   Fax 0972.83694 E-Mail: mgliseno@nostoisrl.it	Studio Civiltistico	 <b>Ing. Tommaso Monaco</b> Tel. 0885.429850   Fax 0885.090485 E-Mail: ing.tommaso@studiotecnicomonaco.it		
Studio Acustico	 <b>Ing. Antonio Falcone</b> Tel. 0884.534378   Fax. 0884.534378 E-Mail: ing.falcone@alice.it	Studio Geologico-geotecnico	<b>Dott. Donato Antonio Fatigato</b> Via G. Matteotti n. 111 - 71121 Foggia tel/fax 0881 745414 / 0881 771533 e-mail: fatigatodonato@tiscali.it		
Consulenza Topografica	<b>Geom. Ercolino Marinucci Palermo</b> Tel. 0874 839190/ cell. 339 1854984 E-Mail: marinucci.e@libero.it	Studio Agronomico	<b>Dr. Agr. Di Mola Gianpietro</b> Via G. Matteotti n. 111 - 71121 Foggia tel/fax 0881 756289 e-mail: gianp.dimola@libero.it		
Opera	<b>Parco Eolico composto da n.16 Aerogeneratori da 3,3 MW per una potenza complessiva di 52,8 MW nel Comune di Poggio Imperiale (FG)</b>				
Oggetto	Folder: <b>A - PROGETTO GENERALE</b> Nome Elaborato: <b>ETK5E66_Doc_A04</b> Descrizione Elaborato: <b>Relazione di calcolo della gittata massima di elementi rotanti per rottura accidentale della pala e frammenti di pala</b>				
00	Marzo 2014	Emissione per progetto definitivo - Richiesta V.I.A.	Ing. A. Mezzina	Ing. A. Mezzina	IVPC Power 6 S.r.l.
Rev.	Data	Oggetto della revisione	Elaborazione	Verifica	Approvazione
Scala: / Formato: A4	Codice Pratica <b>ETK5E66</b>				



**STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA**  
MEZZINA dott. ing. Antonio  
Via T. Solis, 128 - 71016 San Severo (FG)  
P. IVA 02037220718  
☎ 0882-228072 / ☎ 0882-243651  
✉: [info@studiomezzina.net](mailto:info@studiomezzina.net)



## **IVPC POWER 6 s.r.l.**

**Via Circumvallazione 108**

**83100 AVELLINO**

**PROGETTO DEFINITIVO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA COMPLESSIVA DI  
52,8 MW DA REALIZZARSI NEL COMUNE DI POGGIO IMPERIALE (FG)**

**RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI ELEMENTI ROTANTI PER  
ROTTURA ACCIDENTALE DELLA PALA E DI FRAMMENTI DI PALA**

STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA  
Ing. Mezzina Antonio  
San Severo



**STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA**  
MEZZINA dott. ing. Antonio  
Via T. Solis, 128 - 71016 San Severo (FG)  
P. IVA 02037220718  
☎ 0882-228072 / 📠 0882-243651  
✉: [info@studiomezzina.net](mailto:info@studiomezzina.net)



## INDICE RELAZIONE

1. PREMESSA.
2. INQUADRAMENTO DELL'OPERA.
3. CARATTERISTICHE DELL'AEROGENERATORE.
4. METODO DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA.
5. RISULTATI DEL CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER ROTTURA DELL'INTERA PALA.
6. RISULTATI DEL CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER ROTTURA DI UN FRAMMENTO DI PALA.
7. RIEPILOGO DEI RISULTATI OTTENUTI.
8. CONCLUSIONI.

STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA

Ing. Mezzina Antonio

San Severo

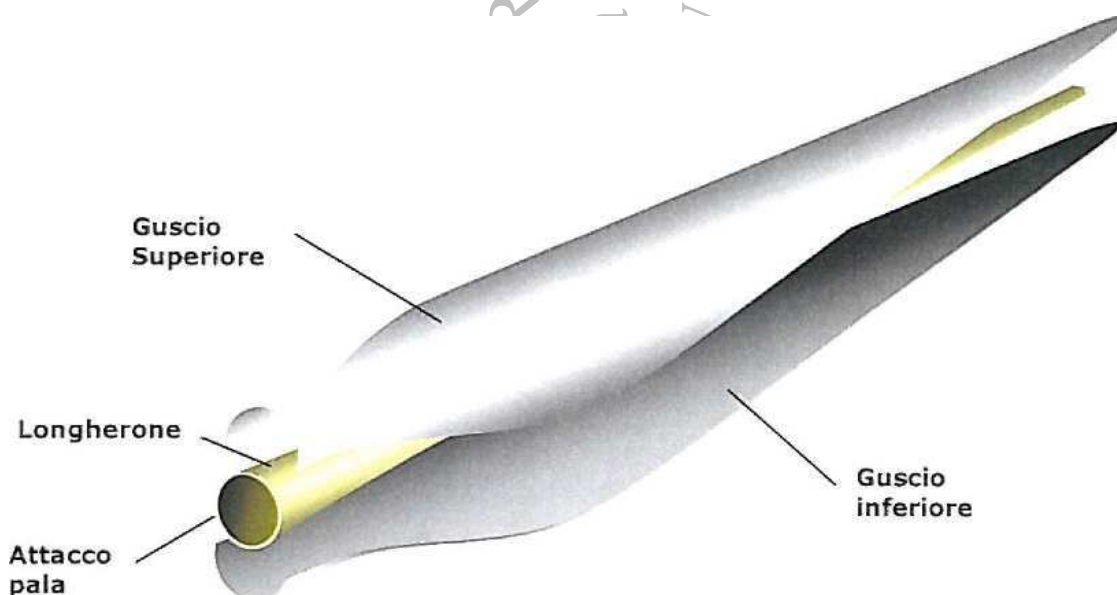
## 1. PREMESSA.

L'obiettivo della presente relazione è determinare la distanza massima raggiungibile dagli elementi rotanti di un aerogeneratore in caso di distacco dell'intera pala dal mozzo per cedimento del sistema di giunzione o di un frammento di essa per urto accidentale o fulminazione atmosferica. Il calcolo della gittata nei casi di distacco di frammenti degli elementi rotanti è da considerarsi del tutto aleatorio per l'impossibilità di stabilire aprioristicamente le dimensioni e la posizione del pezzo in analisi, ragion per cui ci si deve ricondurre ad ipotesi rappresentative.

Per ragioni operative, pertanto, ci si riferisce nel seguito a tre eventi esemplificativi:

1. Rottura della pala intera;
2. Rottura del frammento di pala distante 10 m dalla punta della pala;
3. Rottura del frammento di pala distante 5 m dalla punta della pala.

Di tali casi, il primo costituisce senz'altro quello probabilisticamente più rilevante in ragione della discontinuità strutturale costituita dalla giunzione della pala alla flangia del mozzo a mezzo di collegamenti a vite, ed in effetti statisticamente più riscontrato.



**Figura 1 – Pala di un aerogeneratore**

I casi di rottura di frammenti si riferiscono a parti del rivestimento alare che potrebbero, in caso di urto o folgorazione, staccarsi dal longherone di supporto; tuttavia la casistica è numericamente bassissima, come testimoniato dallo



studio di 1578 casi reali registrati in Nord America ed in Europa da uno studio commissionato dalla Vestas all'ente indipendente BP Power.

Il calcolo è stato eseguito riferendosi alle caratteristiche di un aerogeneratore tripala da 3,3MW, utilizzato nell'impianto di cui trattasi e proposto nella richiesta di Valutazione di Impatto Ambientale.

Tale macchina ha pale di lunghezza pari a 57,15 m ed una velocità di rotazione massima a regime di 17,66 giri/min, con altezza del mozzo pari a 91,5 m rispetto al piede della torre.

## 2. INQUADRAMENTO DELL'OPERA

Il parco eolico sarà realizzato nel comune di Poggio Imperiale (FG), e sarà costituito da n.16 aerogeneratori della potenza di 3,3 MW cadauno per una potenza totale installata pari a 52,8 MW. Nella seguente fig. 1 viene rappresentato il parco eolico su cartografia IGM 1:25000.

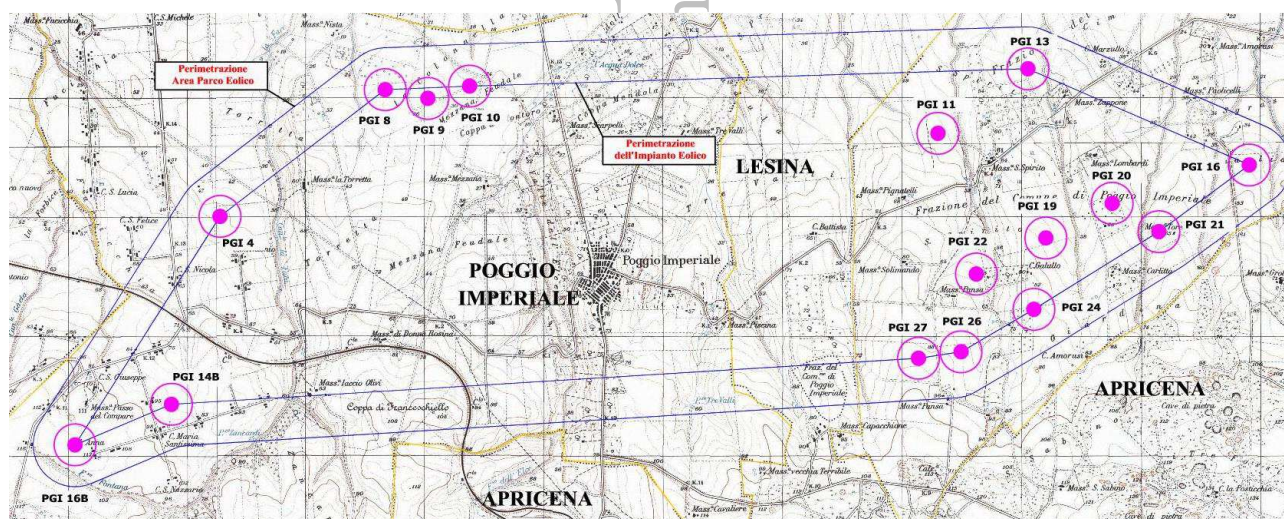


Figura 2 – Inquadramento planimetrico del parco eolico su IGM.

La zona delle installazioni è situata alla quota media di circa 60 m sul livello del mare, da un minimo di 25-30 ad un massimo di 105. Le caratteristiche di ventosità del sito lo rendono idoneo all'installazione di un impianto per la produzione di energia dal vento, come da analisi anemometriche effettuate in loco.

Nella Figura 3 seguente l'area interessata è individuata su ortofoto.





Figura 3 – Inquadramento geografico del parco eolico con immagine da Google Earth.

### 2.1 Distanze dai principali elementi sensibili dell'area

Si riportano qui di seguito le **distanze minime** dai principali elementi sensibili presenti nell'area di ubicazione del parco eolico.

1. Centro abitato di Lesina	2150m
2. Centro abitato di Poggio Imperiale	1390m
3. S.S. 16 Adriatica	824m
4. S.P. 35 San Severo – Torre Fortore	365m
5. S.P. 37 Lesina – Poggio Imperiale	698m
6. S.P. 38 San Nazario – Poggio Imperiale	593m
7. S.P. 39 San Nazario – Apricena	460m
8. S.S. 693 Strada Statale Garganica	1378m
9. Linea Ferroviaria Adriatica	564m
10. Autostrada A14	360m
11. Aerogeneratori esistenti	823m (corrispondente a circa 7 volte il diametro del rotore)

### 3. CARATTERISTICHE DELL'AEROGENERATORE.

L'impianto eolico, come già descritto in premessa, è costituito da n. 16 aerogeneratori da 3.3 MW, aventi altezza della torre  $h_T$  pari a 91,5 m e lunghezza delle pale pari a 57,15 m, delle quali si offre un disegno schematico quotato (fig. 4).

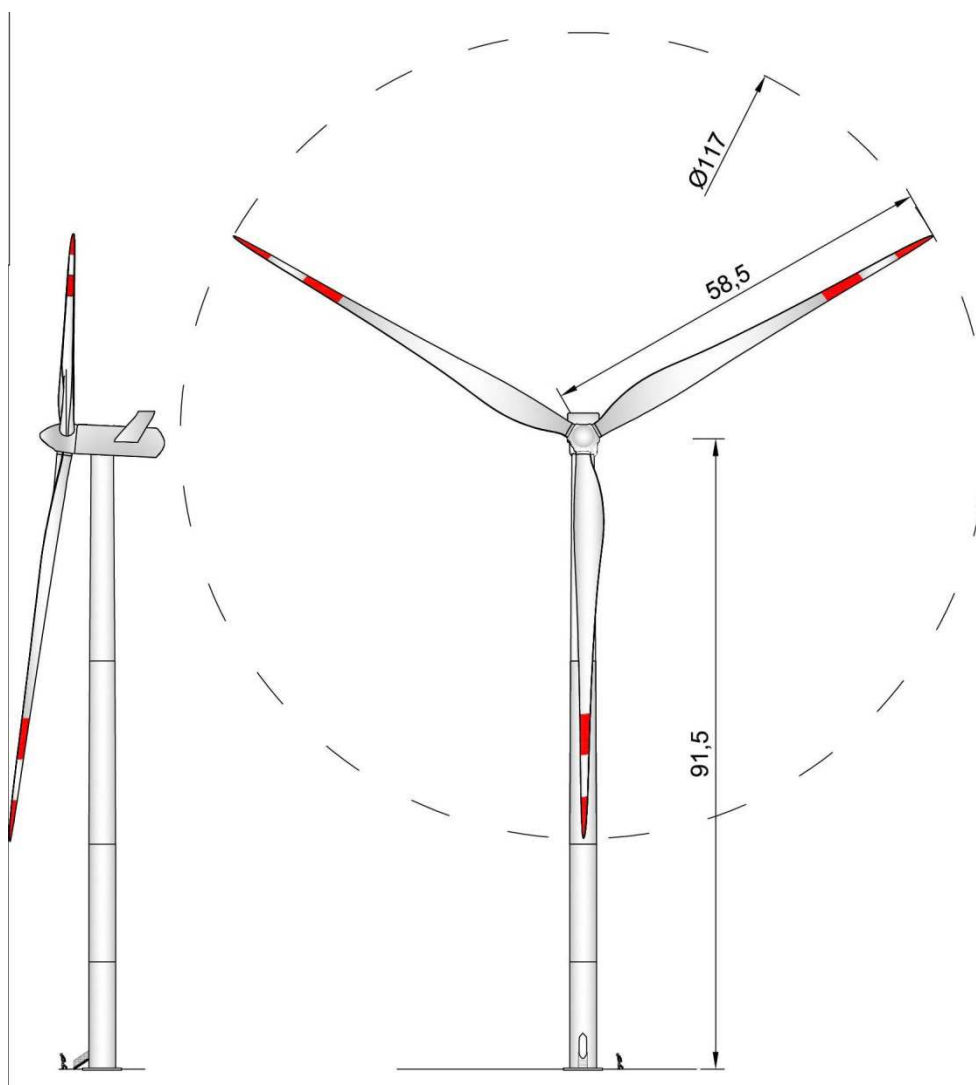


Figura 4 – Schema dell'aerogeneratore di progetto.

La massima velocità angolare del rotore consentita prima dell'intervento dei sistemi di protezione della macchina (*switch-off*), è pari a 17,66 rpm.

### 4. METODO DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA



Per il calcolo della distanza massima percorsa dalla pala o da parti di essa dopo il distacco dall'aerogeneratore è necessario effettuare delle assunzioni esemplificative ma conservative.

Pur trattandosi di un evento con bassissima probabilità di accadimento, potrebbe avere impatti significativi in quanto comporta la proiezione dell'elemento distaccato e la sua successiva ricaduta sul terreno. Il calcolo descritto nel seguito determina il punto di impatto con il terreno rispetto all'aerogeneratore (gittata massima), al fine di verificare la compatibilità dell'opera con gli insediamenti abitativi e le infrastrutture più prossimi agli aerogeneratori.

#### 4.1 Ipotesi.

L'ipotesi di partenza è che la pala o un suo frammento si distacchi accidentalmente mentre il rotore è in movimento nelle peggiori condizioni, ovvero alla massima velocità angolare a regime.

Il moto risultante sarà quello di un corpo libero, soggetto alle forze inerziali, di gravità ed alle forze aerodinamiche; queste ultime sono determinate non solo dal moto proprio del corpo (velocità assoluta rispetto al sistema di riferimento adottato) ma anche dall'influenza del vento e sue raffiche (velocità relativa). La sua dinamica è pertanto estremamente complessa in quanto governata da numerose variabili come la forma della superficie palare, la massa e la sua distribuzione, gli angoli di incidenza e di swirl, alcuni dei quali non controllabili e non prevedibili come nel caso del vento.

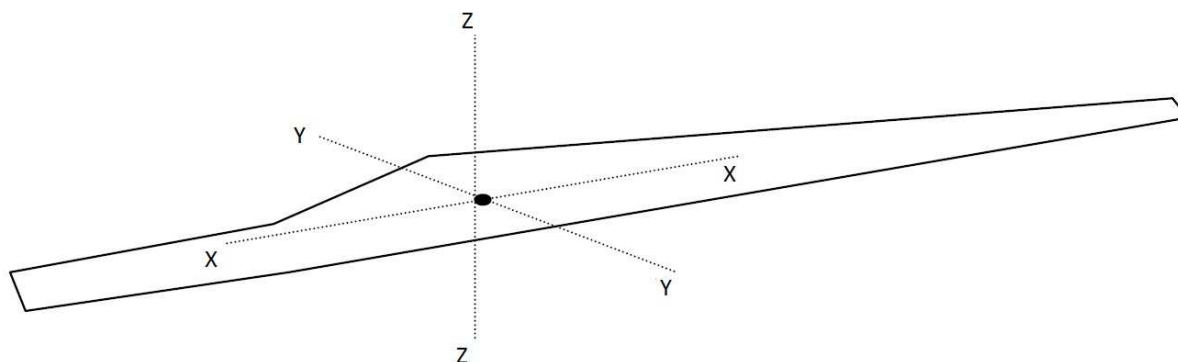


Figura 5 – Sistema di coordinate usato per la pala

Gli angoli dell'ala rispetto alla direzione di avanzamento, ovvero i coefficienti di resistenza e portanza, durante la parabola di caduta non sono peraltro univocamente determinati sulla base di quelli posseduti al momento del distacco ma variabili istante per istante: infatti le forze inerziali (per la conservazione della quantità di moto) determineranno la rotazione della pala o del frammento attorno ai tre assi principali di inerzia, così come ostacolata e modificata dalle spinte aerodinamiche connesse con la cinematica dell'oggetto.

Il moto che ne deriva è di tipo rototraslatorio ma non è ragionevolmente possibile prevederlo con completezza. Tuttavia si possono formulare ipotesi semplificative, e tuttavia conservative, assumendo il caso puramente





accademico che il corpo si disponga con la dimensione principale allineata all'orizzonte, posizione tale da offrire la minima resistenza con l'aria rispetto alla direzione di avanzamento orizzontale (*moto del profilo alare*) e massimo attrito rispetto a quelle verticali (*massima portanza*).

Tutte queste assunzioni risultano conservative ai fini della gittata massima; in questo modo la gittata reale non sarà superiore a quella calcolata, poiché nel caso reale il coefficiente di resistenza aerodinamica sarà continuamente maggiore di quello del caso del moto "a giavellotto", in ragione della rotazione della pala attorno ai propri assi d'inerzia.

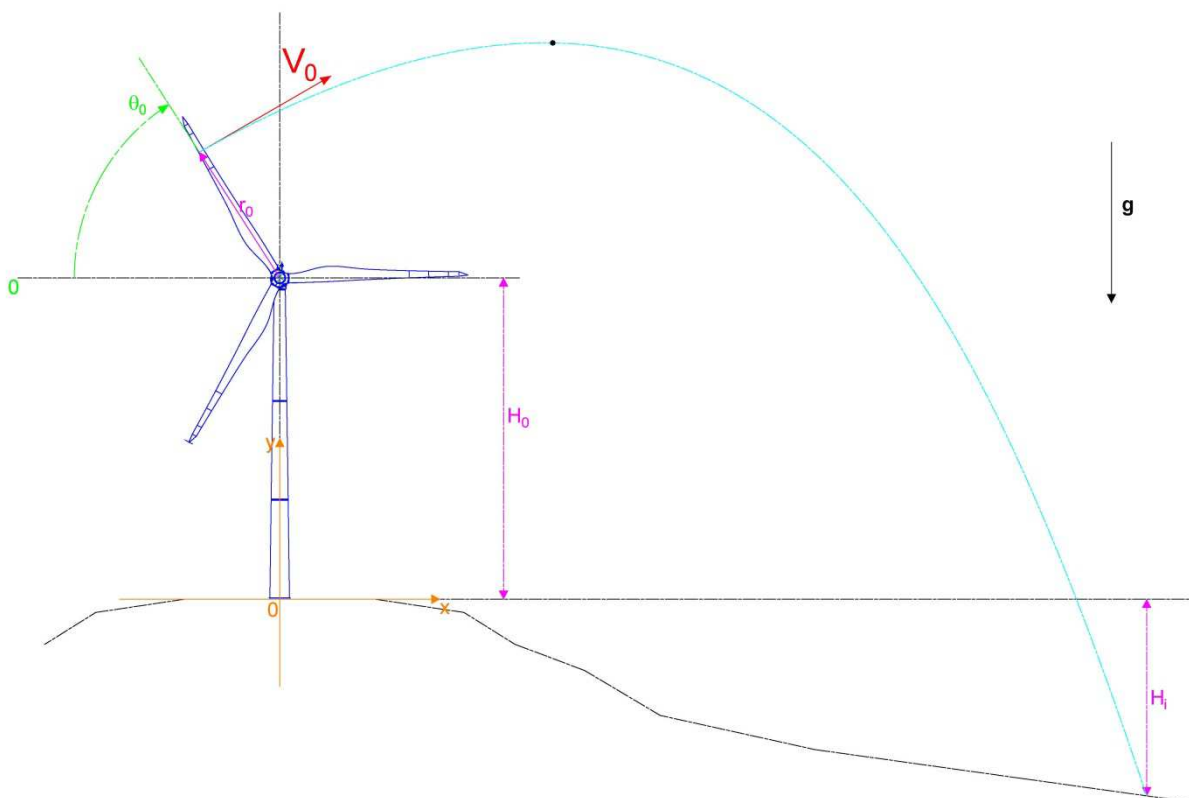
Nel modello di calcolo utilizzato si assumerà che il sistema di forze che reggono il moto sia applicato al centro di massa dell'oggetto distaccato, in tal modo riconducendosi alla dinamica del punto materiale.

Modello Aerogeneratore	Lunghezza della pala (m)	Area nel piano XY	Area nel piano XZ	Area nel piano YZ	Massa
		m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	Kg
D = 117 m	57,15	128.66	32.89	2.94	13300

#### 4.2 Modello di calcolo

Si osserva innanzitutto che le equazioni qui di seguito trattate si riferiscono all'emiciclo ascendente della pala, tra i 270° e i 90°, a sinistra rispetto alla torre considerata nella figura che segue; il caso discendente è irrilevante ai fini della gittata massima, poiché il lancio tra i 90° e i 270° è ad alzo negativo, e pertanto di gittata senz'altro inferiore rispetto all'arco di lancio nel semipiano opposto.

Come evidente dalla figura, si assume che l'aerogeneratore si trovi in una posizione sopraelevata rispetto al punto di caduta, in modo da ottenere una gittata calcolata il più possibile realistica; il dislivello  $H_i$ , altezza di installazione rispetto al punto di caduta, non può essere assunto a priori ma deve valutarsi in funzione della gittata; Pertanto si calcolerà prima il valore della gittata rispetto al piano di installazione; sulla base del valore di gittata ottenuto si valuterà la  $H_i$  corrispondente procedendo ad un nuovo calcolo iterativo. In alternativa si può procedere per via grafica valutando l'intersezione della traiettoria calcolata con il profilo altimetrico più sfavorevole nel punto considerato.



**Figura 6 – Schema di massima del fenomeno oggetto di studio.**

Le equazioni che reggono il moto del modello adottato sono quelle di un punto materiale soggetto alla forza di gravità, alla portanza lungo l'asse  $y$  ed alla resistenza dell'aria lungo l'asse  $x$ . Scrivendo l'equazione della dinamica in forma scalare nel piano di gittata si ottiene:

$$\ddot{x} = -k_x \dot{x}^2, \quad [1]$$

$$\ddot{y} = -g - k_y \dot{y}^2, \quad [2] \text{ per il tratto ascendente;}$$

$$\ddot{y} = -g + k_y \dot{y}^2, \quad [3] \text{ per il tratto discendente.}$$

dove  $g = 9,81\text{m/s}^2$ , costante nel campo del moto considerato, è l'accelerazione di gravità, e  $k_x$  è un termine costante dato dalla seguente espressione:

$$k_x = \frac{1}{2} \rho \frac{S_x C_x}{m} \quad [4]$$

con  $\rho$  densità dell'aria,  $S_x$  l'area della sezione del frammento misurata nel piano  $YZ$ ,  $C_x$  il suo coefficiente di resistenza aerodinamica ed  $m$  la massa.

Per  $k_y$  vale l'analogo nell'asse ortogonale:



**STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA**  
 MEZZINA dott. ing. Antonio  
 Via T. Solis, 128 - 71016 San Severo (FG)  
 P. IVA 02037220718  
 ☎ 0882-228072 / 📠 0882-243651  
 ✉: [info@studiomezzina.net](mailto:info@studiomezzina.net)



$$k_y = \frac{1}{2} \rho \frac{S_y C_y}{m} \quad [5]$$

La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo  $\alpha_0$  di distacco, dalla distanza del centro di massa del frammento di pala dall'asse del mozzo  $r_0$  e dalla velocità tangenziale  $V$  del frammento di pala al momento del distacco.

Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$\begin{aligned} x_0 &= -r_0 \cos \alpha_0 \\ y_0 &= H + r_0 \sin \alpha_0 \\ v_x &= V \sin \alpha_0 \\ v_y &= V \cos \alpha_0 \end{aligned}$$

dove  $H$  è l'altezza della torre incrementata dell'eventuale dislivello nel caso in cui l'aerogeneratore si trovi in una posizione sopraelevata.

Integrando due volte l'equazione della dinamica lungo l'asse  $x$  [1], si ricava la legge oraria del moto:

$$x(t) = \frac{1}{k_x} \ln |(k_x V \sin \alpha_0) t + 1| - r_0 \cos \alpha_0 \quad [6]$$

Analizziamo ora il tratto ascendente del moto parabolico del proietto. Indicando con  $v$  la componente verticale della velocità, dalla [2] si ottiene:

$$\tan^{-1} \left( v \sqrt{\frac{k_y}{g}} \right) = \tan^{-1} \left( v_y \sqrt{\frac{k_y}{g}} \right) - \sqrt{g k_y} t \quad [7]$$

E quindi, con semplici passaggi trigonometrici, la relativa espressione della velocità:

$$v(t) = \sqrt{\frac{g}{k_y}} \frac{v_y - \sqrt{\frac{g}{k_y}} \tan(t \sqrt{g k_y})}{\sqrt{\frac{g}{k_y}} + v_y \tan(t \sqrt{g k_y})} \quad [8]$$

Il punto di inversione del moto e quindi di massima altezza si ottiene al tempo  $T_{max}$  quando la componente verticale della velocità si annulla, ovvero, dalla [7]:

$$T_{max} = \frac{1}{\sqrt{g k_y}} \tan^{-1} \left( v_y \sqrt{\frac{k_y}{g}} \right) \quad [9]$$

La legge del moto lungo l'asse  $y$  può essere facilmente ricavata a partire ancora dalla [2] operando sull'identità differenziale della velocità:



$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dy} \frac{dy}{dt} \quad [10]$$

Sostituendo la [10] nella [2] si ottiene l'espressione della posizione in funzione della velocità istantanea:

$$y(v) = \frac{1}{2k_y} \ln \left( \frac{v_y^2 + g/k_y}{v^2 + g/k_y} \right), \quad [11]$$

L'altezza massima raggiunta dal proietto si ottiene imponendo  $v = 0$  nella [11] ed aggiungendovi la quota di partenza  $y_0$ :

$$Y_{max} = \frac{1}{2k_y} \ln \left( \frac{v_y^2 + g/k_y}{g/k_y} \right) + y_0, \quad [12]$$

A partire dal punto di massimo della traiettoria pseudoparabolica del proietto deve applicarsi la [3] per la fase di discesa; con le opportune integrazioni, si ottiene:

$$v(t) = \sqrt{\frac{g}{k_y}} \tanh \left( -t^* \sqrt{gk_y} \right), \quad [13]$$

Dove si è posto  $t^* = t - T_{max}$ , ricordando di aver suddiviso la traiettoria in fase ascendente e discendente; il segno della velocità negativo che ne deriva è connesso alla scelta del sistema di riferimento orientato contro il campo gravitazionale.

Analizzando la [19] si desume che per  $t \rightarrow \infty$  la velocità tende asintoticamente al parametro  $\sqrt{\frac{g}{k_y}}$ , che prende il nome di *velocità limite*  $v_L$ .

Dalla [13] è immediato ottenere la legge oraria per integrazione diretta; ricordando che la quota di partenza è  $Y_{max}$  si ottiene:

$$y(t) = Y_{max} - \frac{1}{k_y} \ln \left[ \cosh \left| t^* \sqrt{gk_y} \right| \right], \quad [14]$$

Dalla [14], si ricava infine il valore del tempo di discesa del frammento di pala, ottenuto per  $y(t) = 0$ :

$$T_d = \frac{1}{\sqrt{gk_y}} \cosh^{-1} [e^{Y_{max}k_y}] \quad [15]$$

Siamo ora in grado di calcolare la gittata  $L$  del frammento di pala, ponendo nella legge del moto orizzontale [6] il valore del tempo di volo  $T_v$  così ottenuto:

$$T_v = T_{max} + T_d \quad [16]$$



## 5. RISULTATI DEL CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER ROTTURA DELL'INTERA PALA

Nel caso di rottura dell'intera pala si è ipotizzata la posizione del centro di massa della pala ad 1/3 dell'altezza relativa alla base, avendo assunto l'analogia semplificatrice con il corpo conico di densità costante.

Il calcolo della gittata massima è stato pertanto effettuato con il centro di massa della pala ( $r_0$ ) distante 16,33 m dal mozzo; la velocità massima angolare del rotore a regime è, da *datasheet*, pari a 17,66 giri/min ( $\omega_0$ ).

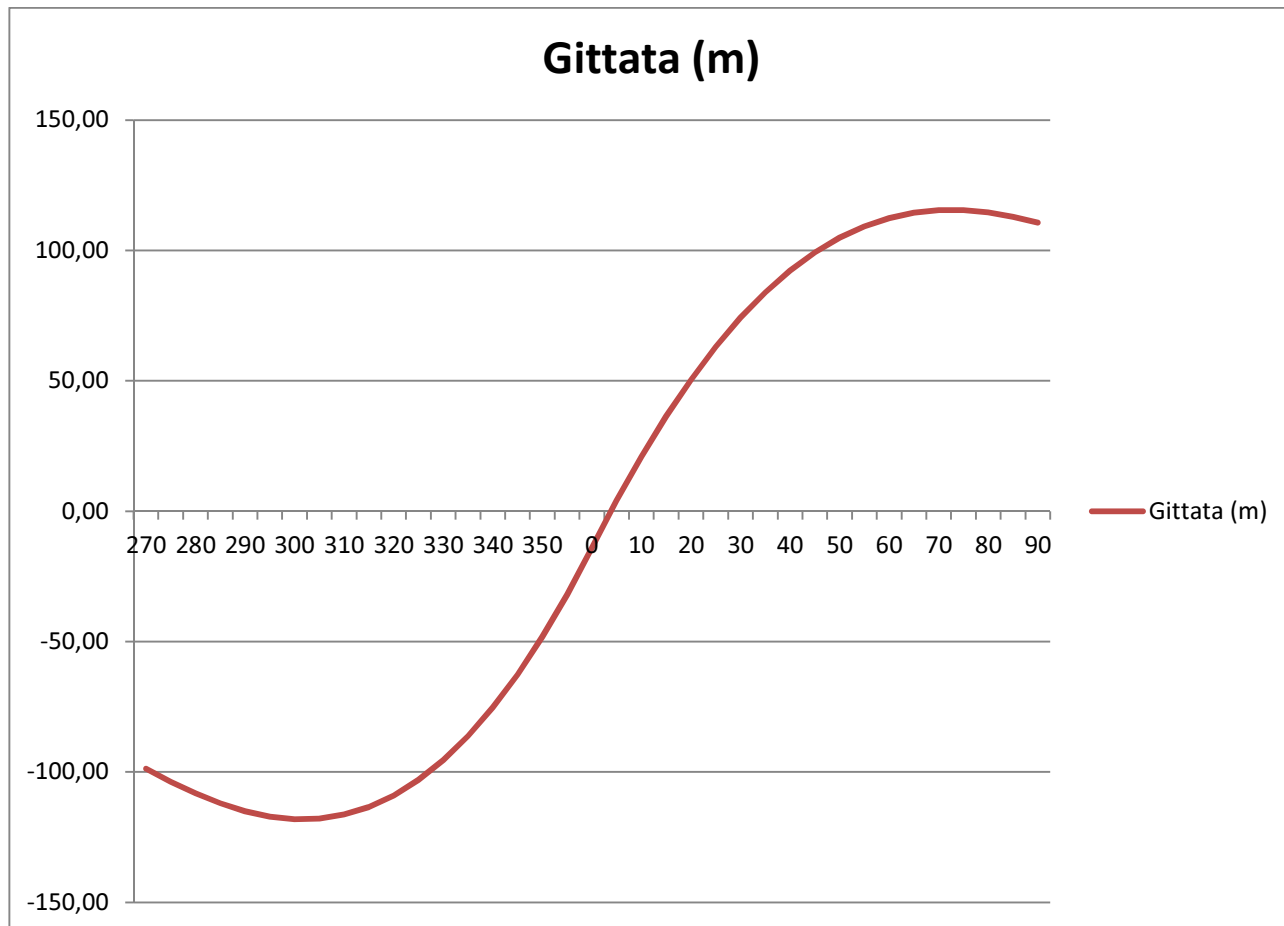
Nella seguente tabella sono rappresentati i valori di ingresso da introdurre nella risoluzione delle equazioni del moto e i valori ottenuti per i coefficienti  $k_x$  e  $k_y$

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		1,225	
$S_x$ (m <sup>2</sup> )	2.94	$S_y$ (m <sup>2</sup> )	128,66
$C_x$	0,9	$C_y$	1
$k_x = \frac{1}{2} \rho \frac{S_x C_x}{m}$	<b>0,00409</b>	$k_y = \frac{1}{2} \rho \frac{S_y C_y}{m}$	<b>0,00303</b>
$m$ (kg)		13300	

Il calcolo della gittata massima è stato effettuato implementando le equazioni descritte al paragrafo precedente in un programma su foglio excel.

Qui di seguito il grafico che rappresenta la variazione della gittata in funzione dell'angolo di distacco:





**Figura 7 – Gittata massima al variare dell'angolo di distacco per la rottura dell'intera pala.**

I valori massima di gittata ed elevazione nelle condizioni di calcolo sono stati individuati come segue:

Angolo di massima gittata	300°	Angolo di massima elevazione	15°
Gittata massima	<b>118,09m</b>	Elevazione massima	144,48m

## **6. RISULTATI DEL CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER ROTTURA DI UN FRAMMENTO DI PALA**

Per il calcolo della gittata massima per rottura di un frammento di pala sono stati presi in considerazione le due seguenti situazioni:

- Rottura di un frammento di pala a distanza di 10 m dalla punta della pala;
- Rottura di un frammento di pala a distanza di 5 m dalla punta della pala;



### 6.1 Rottura di un frammento di pala distante 10 m dalla punta della pala

In questo caso si ipotizza che il centro di massa sia posizionato a metà della lunghezza del frammento di pala (ipotesi conservativa). Per questa ragione la distanza ( $r_0$ ) di detto centro dall'asse del mozzo è pari a 52,15 m.

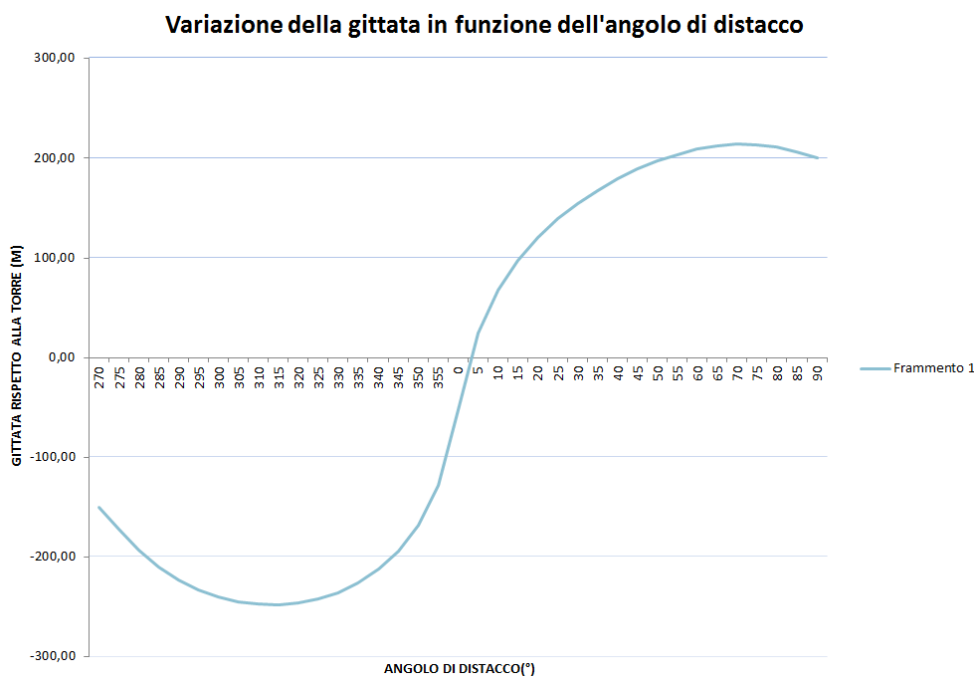
Nella seguente tabella sono rappresentati gli altri valori di ingresso da introdurre nella risoluzione delle equazioni del moto e i valori ottenuti per i coefficienti  $k_x$  e  $k_y$

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		1,225	
$S_x$ (m <sup>2</sup> )	0,351	$S_y$ (m <sup>2</sup> )	7,97
$C_x$	1,05	$C_y$	1,2
$k_x = \frac{1}{2} \rho \frac{S_x C_x}{m}$	<b>0,01042</b>	$k_y = \frac{1}{2} \rho \frac{S_y C_y}{m}$	<b>0,00794</b>
$m$ (kg)		385	

I valori massima di gittata ed elevazione nelle condizioni di calcolo sono stati individuati come segue:

Angolo di massima gittata	315°	Angolo di massima elevazione	25°
Gittata massima	<b>247,76m</b>	Elevazione massima	257,70m

Qui di seguito il grafico che rappresenta la variazione della gittata in funzione dell'angolo di distacco:



**Figura 8 – Variazione della gittata massima in funzione dell'angolo di distacco per la rottura del frammento di pala distante 10 m dalla punta della pala.**

### 6.2 Rottura di un frammento di pala distante 5 m dalla punta della pala

Anche in questo caso si ipotizza che il centro di massa sia posizionato a metà della lunghezza del frammento di pala. Per questa ragione la distanza ( $r_0$ ) di detto centro dall'asse del mozzo è pari a 54,65 m.

Nella seguente tabella sono rappresentati gli altri valori di ingresso da introdurre nella risoluzione delle equazioni del moto e i valori ottenuti per i coefficienti  $k_x$  e  $k_y$

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		1,225	
$S_x$ (m <sup>2</sup> )	0,146	$S_y$ (m <sup>2</sup> )	2,94
$C_x$	0,9	$C_y$	1
$k_x = \frac{1}{2} \rho \frac{S_x C_x}{m}$	<b>0,01195</b>	$k_y = \frac{1}{2} \rho \frac{S_y C_y}{m}$	<b>0,00885</b>
m (kg)		106,75	

I valori massima di gittata ed elevazione nelle condizioni di calcolo sono stati individuati come segue:

Angolo di massima gittata	315°	Angolo di massima elevazione	25°
---------------------------	------	------------------------------	-----



Gittata massima	<b>236.42m</b>	Elevazione massima	255,94m
-----------------	----------------	--------------------	---------

Qui di seguito il grafico che rappresenta la variazione della gittata in funzione dell'angolo di distacco:



**Figura 9 – variazione della gittata in funzione dell'angolo di distacco per la rottura del frammento di pala distante 5 m dalla punta della pala.**

## **7. RIEPILOGO DEI RISULTATI OTTENUTI**

Nella tabella riepilogativa seguente si mostrano i risultati ottenuti nei tre casi di studio: rottura dell'intera pala, rottura di un frammento di pala distante 10 m dalla punta della pala e rottura di un frammento di pala distante 5 m dalla punta della pala.

In tutti i casi si è assunto conservativamente che il baricentro della sezione spezzata si trovi nella mezzeria della stessa.



**STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA**  
 MEZZINA dott. ing. Antonio  
 Via T. Solis, 128 - 71016 San Severo (FG)  
 P. IVA 02037220718  
 ☎ 0882-228072 / 📠 0882-243651  
 ✉: [info@studiomezzina.net](mailto:info@studiomezzina.net)



CASI DI STUDIO	Massa del proietto	Elevazione massima	Tempo di volo per gittata massima	Gittata
Rottura dell'intera pala	13300 kg	144,48 m	6,25 s	118,09 m
Rottura di un frammento distante 10 m dalla punta della pala	385 kg	257,7 m	11,27 s	247,76 m
Rottura di un frammento distante 5 m dalla punta della pala	106,75 kg	255,94 m	11,27 s	236,42 m

Il massimo valore di gittata calcolato tra tutti i casi considerati è pari a **247,76 m** e risulta inferiore alla minima distanza degli aerogeneratori dagli insediamenti abitativi e dalle infrastrutture più vicine. Tenendo presente che il calcolo eseguito e descritto nella presente relazione è basato su ipotesi conservative (massima gittata in assenza di aria o con moto "puro giavellotto"), si può affermare che in caso di rottura accidentale di una pala o di parte di essa non ci sia rischio di impatto con strutture sensibili (strade, abitazioni).

Come si evince dalla fig. 10, nella quale viene evidenziata l'infrastruttura più vicina (Autostrada A14) rispetto alla posizione dell'aerogeneratore PGI 8, la circonferenza di raggio pari alla gittata massima di 247,76 m non intercetta nessun elemento sensibile e le zone sensibili con le relative fasce di rispetto: come evidente euristicamente, in nessun caso le aree, nelle quali può verificarsi la caduta di elementi rotanti, si sovrappongono alle infrastrutture viciniore.



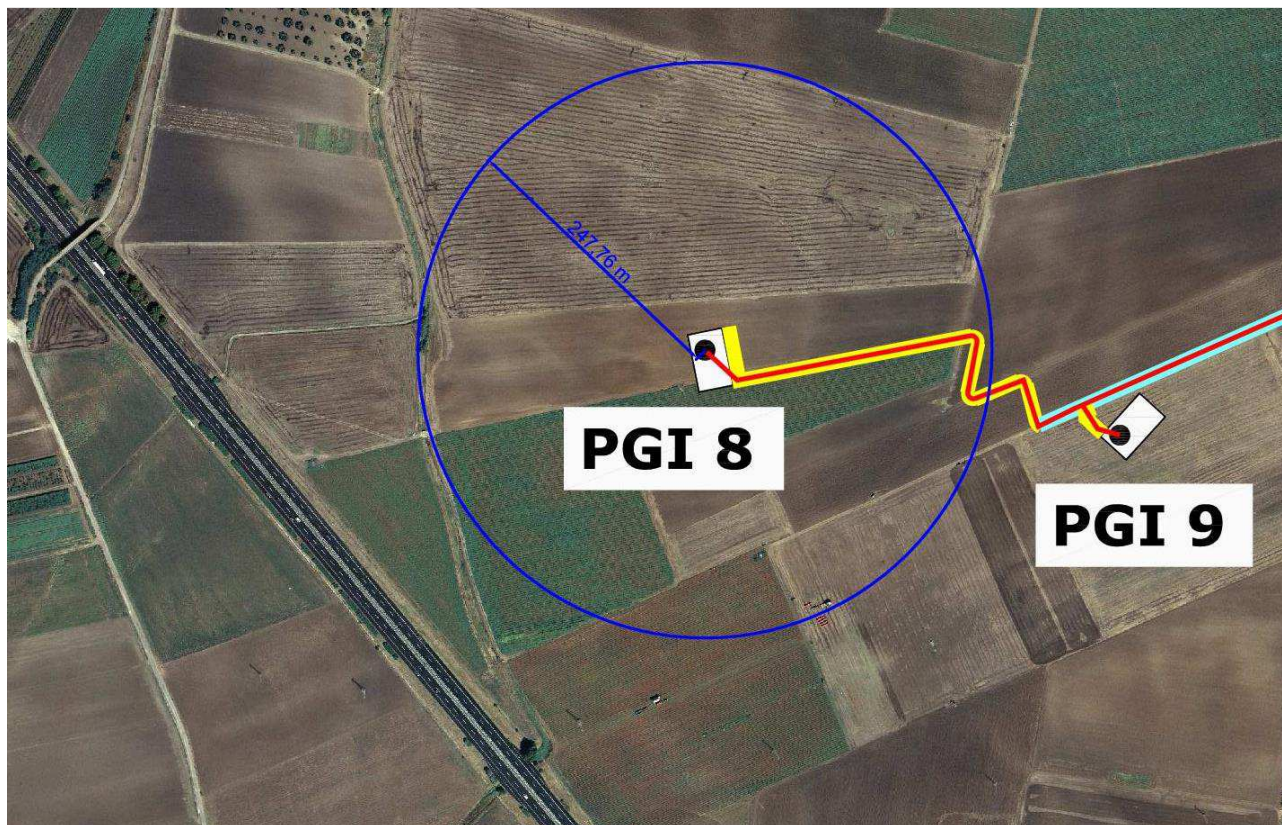


Figura 10 – Inquadramento su ortofoto con, in evidenza, le aree circolari di gittata massima: come è evidente in nessun caso si intercettano le infrastrutture.

Elementi sensibili	Distanze minime
Centro abitato di Lesina	2150 m
Centro abitato di Poggio Imperiale	1390 m
S.S. 16 Adriatica	824 m
S.P. 35 San Severo – Torre Fortore	365 m
S.P. 37 Lesina – Poggio Imperiale	698 m
S.P. 38 San Nazario – Poggio Imperiale	593 m
S.P. 39 San Nazario – Apricena	460 m
S.S. 693 Strada Statale Garganica	1378 m
Linea Ferroviaria Adriatica	564 m
Autostrada A14	360 m

## 8. CONCLUSIONI

Non sono presenti nelle vicinanze insediamenti abitativi a carattere continuativo.



L'accadimento di fenomeni tipo colpi di fulmine o urti accidentali che possono determinare l'eventuale distacco della pala ha un valore di rischio molto bassi, resi ancora più bassi dal fattore di contemporaneità.

Si tenga conto inoltre che tutti gli aerogeneratori sono dotati di un complesso sistema parafulmine, mentre per un urto accidentale è molto difficile pensare di potersi tutelare.

In conclusione, pur essendo la rottura accidentale di una pala o di parte di essa un evento altamente improbabile, la gittata massima dell'elemento rotante nei tre casi di studio presi in esame risulta essere inferiore alla distanza degli aerogeneratori dagli elementi sensibili più vicini.

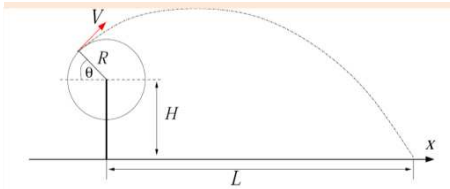
Si allegano i fogli di calcolo excel che hanno determinato il calcolo della gittata massima dell'intera pala o frammenti di essa al variare dell'angolo di distacco.

San Severo, Marzo 2014

**STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA**  
Ing. MEZZINA Antonio



STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA  
Ing. Mezzina Antonio  
San



Inserire le variabili del sistema nei campi in bianco sottostanti

Raggio al centro di massa del frammento (m) 14,05

Altezza mozzo (m) 91,5

Quota del piede della torre rispetto ad area circostante 20

Velocità angolare (rpm) 17,66

densità aria 1,225

Superficie frontale Sx 2,94

Coefficiente di resistenza Cx 0,8

Superficie frontale Sy 128,66

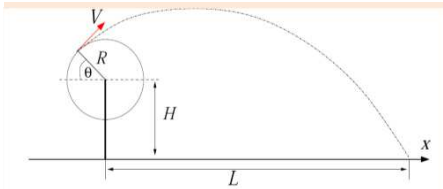
Coefficiente di resistenza Cy 1

Massa del frammento 13300

Angolo di distacco (gradi°)	GITTATA (m)	Vx	Vy	Tmax (istante di inversione del moto)	Ymax	Td tempo di discesa	Tv Tempo di volo
270	-98,70	-25,98	0,00	0,00	97,45	4,68	4,6800
275	-103,72	-25,88	2,26	0,23	97,76	4,69	4,9191
280	-108,21	-25,59	4,51	0,46	98,70	4,71	5,1719
285	-112,03	-25,10	6,72	0,68	100,22	4,75	5,4350
290	-115,04	-24,42	8,89	0,90	102,28	4,81	5,7047
295	-117,10	-23,55	10,98	1,11	104,80	4,87	5,9770
300	-118,09	-22,50	12,99	1,30	107,72	4,95	6,2477
305	-117,87	-21,28	14,90	1,49	110,94	5,03	6,5129
310	-116,35	-19,90	16,70	1,66	114,38	5,11	6,7690
315	-113,42	-18,37	18,37	1,81	117,93	5,20	7,0125
320	-109,01	-16,70	19,90	1,95	121,52	5,29	7,2406
325	-103,05	-14,90	21,28	2,08	125,06	5,37	7,4506
330	-95,47	-12,99	22,50	2,18	128,46	5,46	7,6404
335	-86,23	-10,98	23,55	2,28	131,66	5,53	7,8082
340	-75,28	-8,89	24,42	2,35	134,59	5,60	7,9526
345	-62,60	-6,72	25,10	2,41	137,21	5,66	8,0724
350	-48,16	-4,51	25,59	2,45	139,46	5,72	8,1668
355	-31,97	-2,26	25,88	2,48	141,32	5,76	8,2350
0	-14,05	0,00	25,98	2,49	142,76	5,79	8,2767
5	4,09	2,26	25,88	2,48	143,77	5,81	8,2916
10	20,93	4,51	25,59	2,45	144,34	5,83	8,2797
15	36,38	6,72	25,10	2,41	144,48	5,83	8,2411
20	50,41	8,89	24,42	2,35	144,20	5,82	8,1763
25	63,01	10,98	23,55	2,28	143,53	5,81	8,0858
30	74,17	12,99	22,50	2,18	142,51	5,79	7,9705
35	83,91	14,90	21,28	2,08	141,17	5,75	7,8314
40	92,24	16,70	19,90	1,95	139,58	5,72	7,6702
45	99,21	18,37	18,37	1,81	137,80	5,68	7,4884
50	104,86	19,90	16,70	1,66	135,90	5,63	7,2883
55	109,23	21,28	14,90	1,49	133,96	5,59	7,0724
60	112,40	22,50	12,99	1,30	132,06	5,54	6,8435
65	114,43	23,55	10,98	1,11	130,27	5,50	6,6048
70	115,41	24,42	8,89	0,90	128,68	5,46	6,3598
75	115,42	25,10	6,72	0,68	127,36	5,43	6,1119
80	114,57	25,59	4,51	0,46	126,37	5,41	5,8647
85	112,94	25,88	2,26	0,23	125,76	5,39	5,6217
90	110,65	25,98	0,00	0,00	125,55	5,39	5,3859

MAX 118,09





Inserire le variabili del sistema nei campi in bianco sottostanti

Raggio al centro di massa del frammento (m) 52,15

Altezza mozzo (m) 91,5

Quota del piede della torre rispetto ad area circostante 20

Velocità angolare (rpm) 17,66

densità aria 1,225

Superficie frontale Sx 0,351

Coefficiente di resistenza Cx 0,9

Superficie frontale Sy 7,97

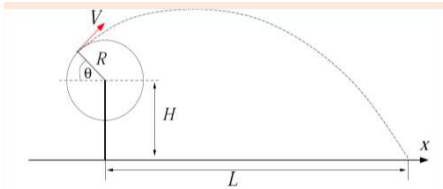
Coefficiente di resistenza Cy 1,2

Massa del frammento 385

Angolo di distacco (gradi°)	GITTATA (m)	Vx	Vy	Tmax (istante di inversione del moto)	Ymax	Td tempo di discesa	Tv Tempo di volo
270	-150,02	-96,44	0,00	0,00	59,35	3,76	3,7575
275	-172,17	-96,08	8,41	0,84	63,05	3,89	4,7323
280	-192,60	-94,98	16,75	1,59	73,03	4,24	5,8339
285	-209,52	-93,16	24,96	2,21	86,84	4,70	6,9173
290	-222,75	-90,63	32,99	2,70	102,27	5,20	7,9034
295	-232,72	-87,41	40,76	3,08	117,90	5,69	8,7708
300	-239,93	-83,52	48,22	3,37	132,99	6,15	9,5261
305	-244,72	-79,00	55,32	3,60	147,25	6,58	10,1843
310	-247,31	-73,88	61,99	3,78	160,56	6,98	10,7608
315	-247,76	-68,20	68,20	3,92	172,93	7,35	11,2687
320	-246,06	-61,99	73,88	4,04	184,37	7,68	11,7186
325	-242,05	-55,32	79,00	4,13	194,95	7,99	12,1183
330	-235,46	-48,22	83,52	4,20	204,69	8,27	12,4741
335	-225,85	-40,76	87,41	4,26	213,62	8,53	12,7903
340	-212,43	-32,99	90,63	4,30	221,76	8,77	13,0700
345	-193,90	-24,96	93,16	4,34	229,12	8,98	13,3154
350	-167,66	-16,75	94,98	4,36	235,70	9,17	13,5278
355	-127,63	-8,41	96,08	4,37	241,49	9,34	13,7077
0	-52,15	0,00	96,44	4,38	246,46	9,48	13,8550
5	24,72	8,41	96,08	4,37	250,58	9,60	13,9690
10	67,51	16,75	94,98	4,36	253,82	9,69	14,0486
15	97,40	24,96	93,16	4,34	256,12	9,76	14,0920
20	120,40	32,99	90,63	4,30	257,43	9,79	14,0968
25	139,04	40,76	87,41	4,26	257,70	9,80	14,0601
30	154,63	48,22	83,52	4,20	256,84	9,78	13,9781
35	167,89	55,32	79,00	4,13	254,77	9,72	13,8462
40	179,25	61,99	73,88	4,04	251,42	9,62	13,6587
45	188,98	68,20	68,20	3,92	246,68	9,49	13,4084
50	197,18	73,88	61,99	3,78	240,46	9,31	13,0867
55	203,91	79,00	55,32	3,60	232,69	9,08	12,6829
60	209,11	83,52	48,22	3,37	223,32	8,81	12,1841
65	212,64	87,41	40,76	3,08	212,42	8,50	11,5761
70	214,31	90,63	32,99	2,70	200,28	8,15	10,8458
75	213,87	93,16	24,96	2,21	187,59	7,78	9,9882
80	211,17	94,98	16,75	1,59	175,74	7,43	9,0218
85	206,47	96,08	8,41	0,84	166,95	7,17	8,0108
90	200,78	96,44	0,00	0,00	163,65	7,07	7,0720

MAX 247,76





Inserire le variabili del sistema nei campi in bianco sottostanti

Raggio al centro di massa del frammento (m) 54,65

Altezza mozzo (m) 91,5

Quota del piede della torre rispetto ad area circostante 20

Velocità angolare (rpm) 17,66

densità aria 1,225

Superficie frontale Sx 0,146

Coefficiente di resistenza Cx 0,8

Superficie frontale Sy 2,94

Coefficiente di resistenza Cy 1

Massa del frammento 106,75

Angolo di distacco (gradi°)	GITTATA (m)	Vx	Vy	Tmax (istante di inversione del moto)	Ymax	Td tempo di discesa	Tv Tempo di volo
270	-142,10	-101,07	0,00	0,00	56,85	3,70	3,6963
275	-163,73	-100,68	8,81	0,88	60,88	3,85	4,7248
280	-183,41	-99,53	17,55	1,65	71,53	4,23	5,8789
285	-199,42	-97,62	26,16	2,26	85,88	4,73	6,9899
290	-211,83	-94,97	34,57	2,73	101,47	5,25	7,9799
295	-221,21	-91,60	42,71	3,08	116,94	5,75	8,8374
300	-228,10	-87,53	50,53	3,35	131,69	6,22	9,5772
305	-232,82	-82,79	57,97	3,56	145,50	6,66	10,2190
310	-235,57	-77,42	64,96	3,72	158,34	7,06	10,7806
315	-236,42	-71,47	71,47	3,85	170,25	7,42	11,2765
320	-235,33	-64,96	77,42	3,95	181,30	7,76	11,7173
325	-232,17	-57,97	82,79	4,03	191,54	8,08	12,1114
330	-226,66	-50,53	87,53	4,10	201,01	8,37	12,4645
335	-218,39	-42,71	91,60	4,15	209,75	8,63	12,7811
340	-206,63	-34,57	94,97	4,19	217,78	8,88	13,0639
345	-190,13	-26,16	97,62	4,22	225,11	9,10	13,3151
350	-166,38	-17,55	99,53	4,24	231,72	9,30	13,5356
355	-129,25	-8,81	100,68	4,25	237,62	9,48	13,7258
0	-54,65	0,00	101,07	4,25	242,77	9,63	13,8855
5	21,39	8,81	100,68	4,25	247,15	9,77	14,0140
10	61,32	17,55	99,53	4,24	250,70	9,87	14,1099
15	88,78	26,16	97,62	4,22	253,40	9,96	14,1713
20	109,83	34,57	94,97	4,19	255,16	10,01	14,1959
25	126,92	42,71	91,60	4,15	255,94	10,03	14,1806
30	141,29	50,53	87,53	4,10	255,66	10,02	14,1217
35	153,63	57,97	82,79	4,03	254,23	9,98	14,0144
40	164,33	64,96	77,42	3,95	251,56	9,90	13,8530
45	173,63	71,47	71,47	3,85	247,54	9,78	13,6303
50	181,65	77,42	64,96	3,72	242,07	9,61	13,3371
55	188,41	82,79	57,97	3,56	235,03	9,40	12,9621
60	193,88	87,53	50,53	3,35	226,34	9,14	12,4911
65	197,92	91,60	42,71	3,08	216,00	8,82	11,9074
70	200,33	94,97	34,57	2,73	204,18	8,46	11,1930
75	200,84	97,62	26,16	2,26	191,45	8,08	10,3357
80	199,24	99,53	17,55	1,65	179,17	7,70	9,3460
85	195,66	100,68	8,81	0,88	169,77	7,41	8,2879
90	191,10	101,07	0,00	0,00	166,15	7,30	7,2984

MAX 236,42

Variazione della gittata in funzione dell'angolo di distacco

