

REGIONE SICILIANA  
LIBERO CONSORZIO COMUNALE DI TRAPANI  
COMUNI DI CALATAFIMI SEGESTA E GIBELLINA

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO EOLICO DI POTENZA PARI A  
 $P_n = 75,4 \text{ MW}$  ( $P_i = 72 \text{ MW}$ ), SU TERRENO SITO NEL COMUNE DI CALATAFIMI SEGESTA (TP)  
 IN CATASTO AI FG. 94 P.LLE 246, 247, 368, 248, 340, 411, AL FG. 99 P.LLE 93, 92, 3, AL FG. 107 P.LLE  
 7, 15, 16, 123, 209, 208, 54, 206, AL FG. 104 P.LLE 4, 49, 33, 156, 157, AL FG. 106 P.LLE 93, 86, 23, 94,  
 AL FG. 107 P.LLA 44, AL FG. 105 P.LLA 128, AL FG. 115 P.LLE 192, 136, 281, 66, 208, AL FG. 117 P.LLE  
 38, 28, E AL FG. 98 P.LLE 468, 463, 469, 470, 471 E ALTRE AFFERENTI ALLE OPERE DI RETE NEI  
 COMUNI DI CALATAFIMI SEGESTA E GIBELLINA (TP)

<p>Timbro e firma del progettista</p> <p><b>Capital Engineering snc</b> Ing. Vincenzo Massaro</p>  <p><b>Capital Engineering snc</b> Ing. Salvatore Li Vigni</p> 	<p>Timbri autorizzativi</p>
--	-----------------------------

ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

IDENTIFICAZIONE ELABORATO							
Livello prog.	ID Terna S.p.A.	Tipo Elabor.	N.ro Elabor.	Project ID	NOME FILE	DATA	SCALA
PDef	202100949	Relazione	15	CANICHIDDEUSI	CAN Rel.15 Analisi rottura organi rotanti Dft.00 del 06 12 22.doc	19.12.2022	-
REVISIONI							
VERSIONE	DATA	DESCRIZIONE			ESEGUITO	VERIFICATO	APPROVATO
Rev.00	19.12.2022	Prima emissione			GR	MC	VM

<p>IL PROPONENTE</p> <p><b>CANICHIDDEUSI WIND SRL</b></p> <p>Sede legale: Corso di Porta Vittoria, 9 - 20122 - Milano          PEC: canichiddeusiwind@mailcertificata.net          P.IVA 12673200965</p>	<p>PROGETTO DI</p> <p><b>CAPITAL ENGINEERING</b></p> <p>Capital Engineering S.n.c.          Sede legale: Via Trinacria, 52 - 90144 - Palermo          e-mail: info@capitalengineering.it</p> <p>SU INCARICO DI</p> <p><b>Coolbine</b></p> <p>Grounded Clean Ventures</p> <p>Coolbine S.r.L.          Sede legale: Via Trinacria, 52 - 90144 - Palermo          e-mail: progettazione@coolbine.it</p>
--	--



Sommario

1. INTRODUZIONE .....	2
2. IPOTESI DI CALCOLO.....	2
3. MODELLO DI CALCOLO DELLA GITTATA .....	3
4. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA.....	5
5. CONCLUSIONI.....	12

## 1. INTRODUZIONE

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.

Premesso che gli aerogeneratori che si utilizzeranno, per l'impianto in oggetto, sono provvisti di sistemi di sicurezza che intervengono quando le condizioni di funzionamento sono tali da compromettere la funzionalità della macchina e la sicurezza pubblica, lo scopo del presente lavoro è fornire una stima della distanza massima che può essere raggiunta da una pala o da un suo frammento, in caso di rottura accidentale durante le condizioni nominali di funzionamento dello stesso.

## 2. IPOTESI DI CALCOLO

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.

Gli aerogeneratori previsti in progetto sono forniti dalla società Vestas aventi le seguenti caratteristiche:

Aerogeneratore	CAN 1	CAN 2	CAN 3	CAN 4	CAN 5	CAN 6	CAN 7	CAN 8	CAN 9	CAN 10	CAN 11	CAN 12	CAN 13
Diámetro Rotore	162 m	162 m	162 m	162 m									
Altezza Mozzo	125 m	125 m	166 m	119 m	166 m	125 m	119 m	166 m	105 m	87 m	119 m	119 m	119 m
Altezza al top	206 m	206 m	247 m	200 m	247 m	206 m	200 m	247 m	186 m	150 m	200 m	200 m	200 m

**Tab. 2 – caratteristiche aerogeneratori**

### 3. MODELLO DI CALCOLO DELLA GITTATA

Il modello teorico che si è scelto per il calcolo della massima gittata è quello del moto parabolico a giavellotto, includendo le sole forze inerziali e trascurando le forze d'attrito viscoso dell'aria, che ne ridurrebbero la distanza di caduta.

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  $(x_0, y_0)$  è la posizione iniziale del punto materiale e  $(v_x, v_y)$  è la sua velocità.

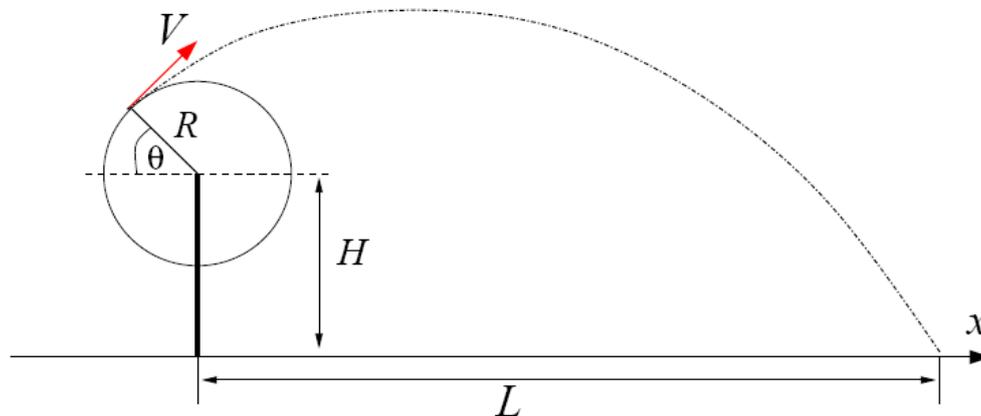
La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo  $T$  tale che  $y(T)=0$ .

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.

### Modello geometrico



La posizione e la velocità iniziale sono determinate dall'angolo  $\theta$  e dalla velocità iniziale  $\mathbf{V}$  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  $\mathbf{V}$  e di  $\theta$ :

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

#### 4. 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).

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.

Nel caso specifico, le condizioni iniziali sono quelle riportate in tabella 2, con una velocità di rotazione di esercizio pari a 12,10 rpm (giri per minuto).

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, quindi supponendo che la rottura della pala avvenga vicino al mozzo e considerando R/3 (lunghezza pala/3).

Per l'aerogeneratore 1 si ottiene una velocità di distacco di circa 35,04 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN01 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

#### GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19 m/s

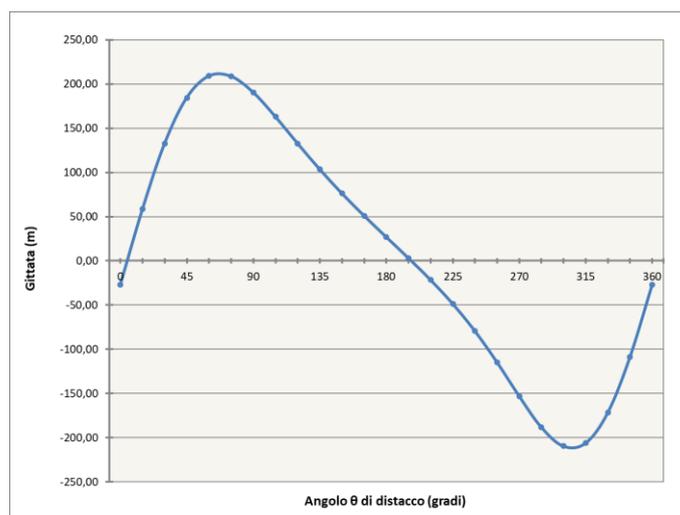
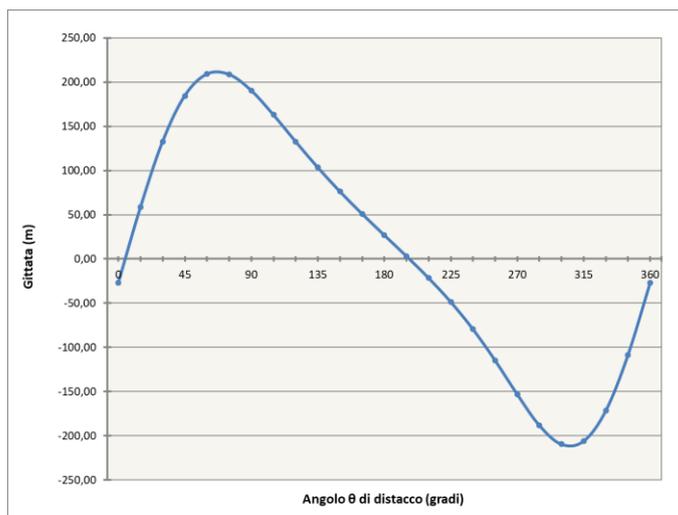


Fig. 4.1 – gittata massima aerogeneratore CAN01

Per l'aerogeneratore 2 si ottiene una velocità di distacco di circa 34,19 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN02 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

**GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19 m/s**

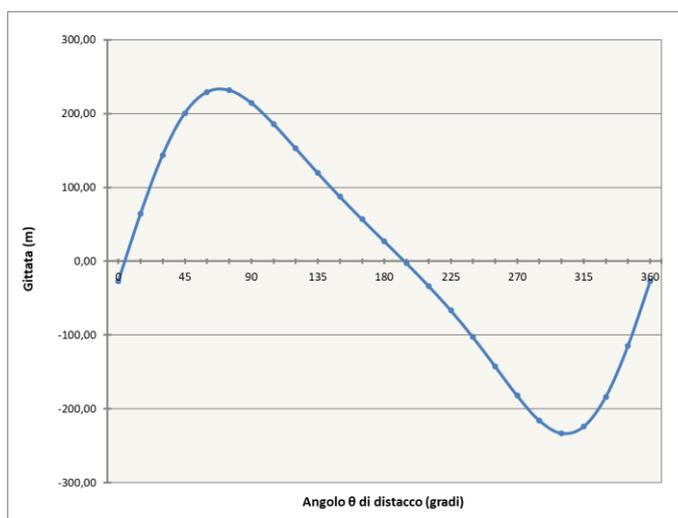


**Fig. 4.2 – gittata massima aerogeneratore CAN02**

Per l'aerogeneratore 3 si ottiene una velocità di distacco di circa 34,19 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN03 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

**GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19 m/s**

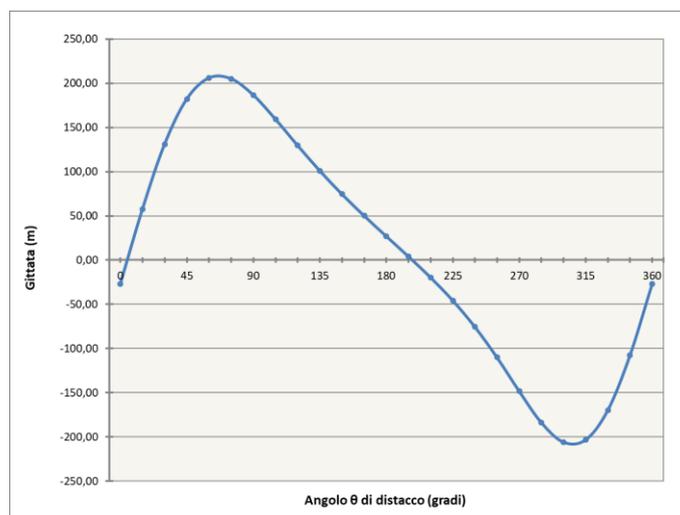


**Fig. 4.3 – gittata massima aerogeneratore CAN03**

Per l'aerogeneratore 4 si ottiene una velocità di distacco di circa 34,19 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN 04 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

**GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19m/s**

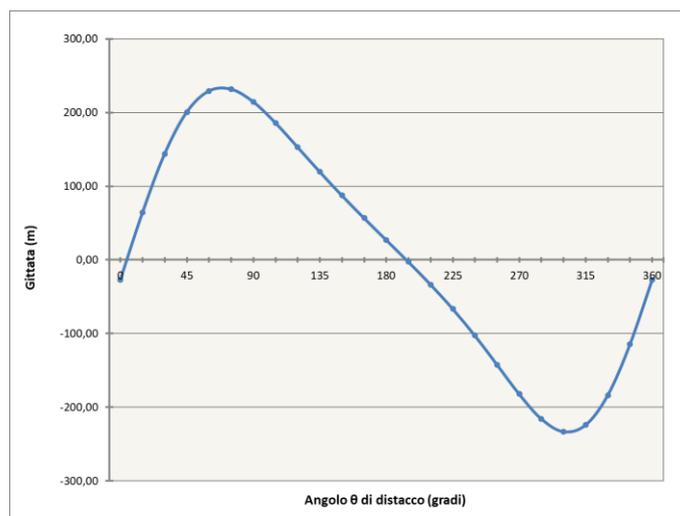


**Fig. 4.4 – gittata massima aerogeneratore CAN 04**

Per l'aerogeneratore 5 si ottiene una velocità di distacco di circa 34,19 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN 05 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

**GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19 m/s**

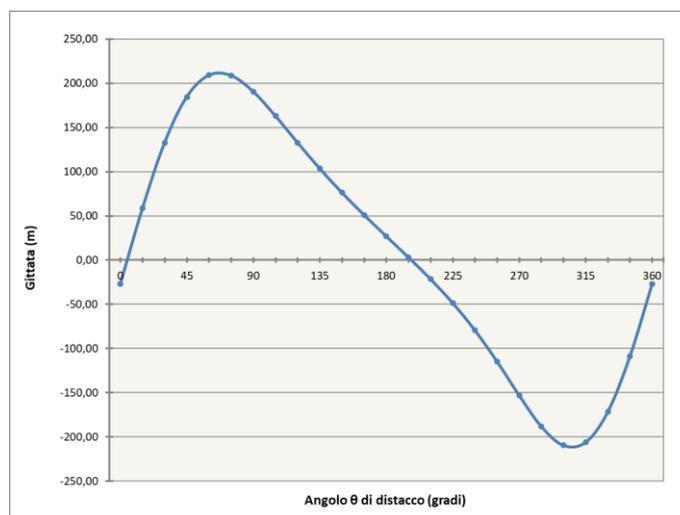


**Fig. 4.5 – gittata massima aerogeneratore WTG05**

Per l'aerogeneratore 6 si ottiene una velocità di distacco di circa 34,19 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN 06 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

**GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19 m/s**

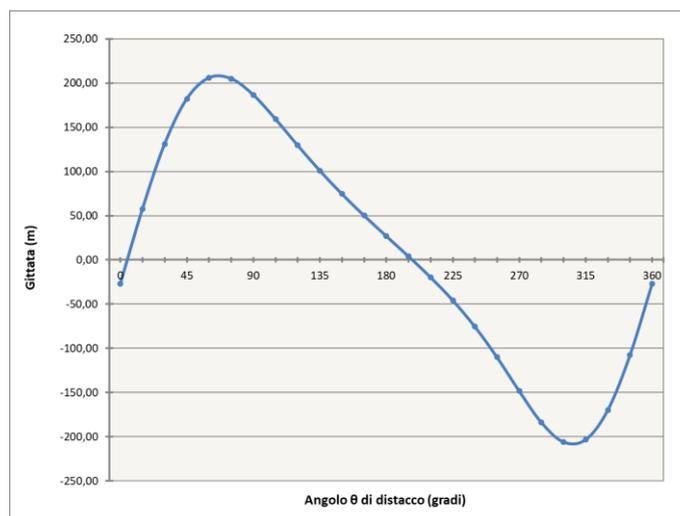


**Fig. 4.6 – gittata massima aerogeneratore CAN 06**

Per l'aerogeneratore 7 si ottiene una velocità di distacco di circa 34,19 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN 07 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

**GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19 m/s**

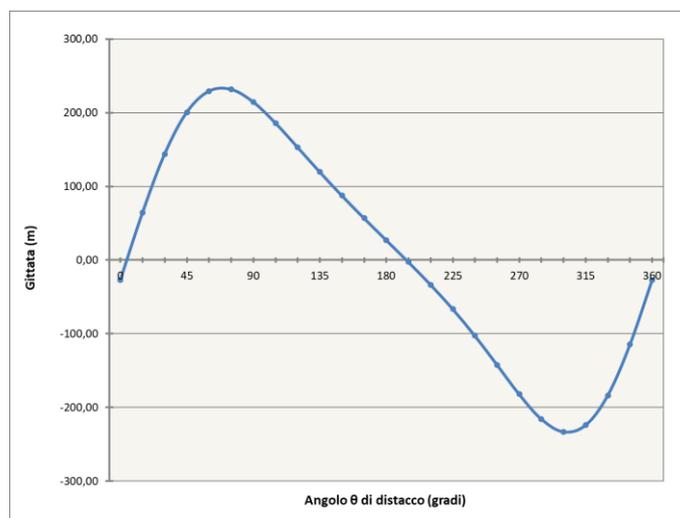


**Fig. 4.7 – gittata massima aerogeneratore CAN 07**

Per l'aerogeneratore 8 si ottiene una velocità di distacco di circa 34,19 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN 08 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

**GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19 m/s**

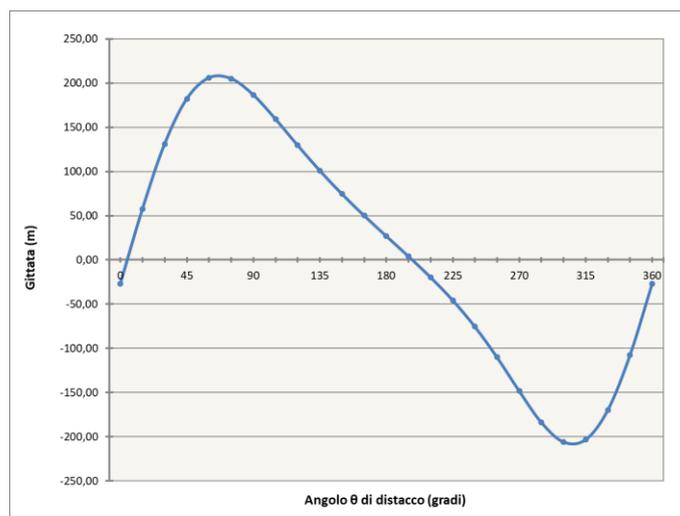


**Fig. 4.8 – gittata massima aerogeneratore CAN 08**

Per l'aerogeneratore 9 si ottiene una velocità di distacco di circa 34,19 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN 09 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

**GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19 m/s**

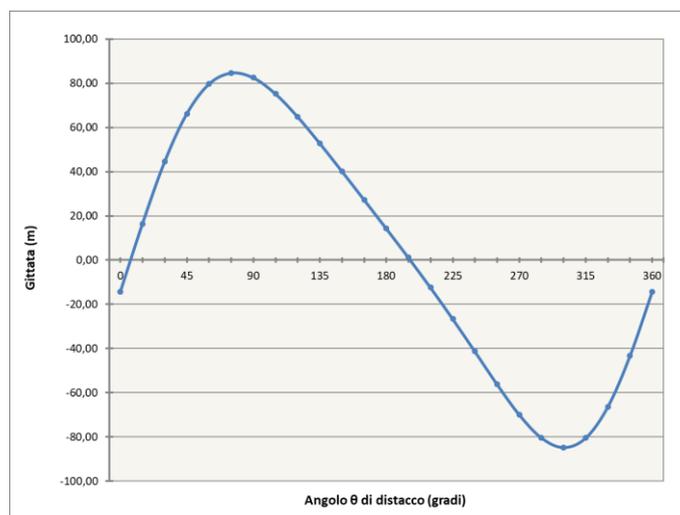


**Fig. 4.9 – gittata massima aerogeneratore CAN 09**

Per l'aerogeneratore 10 si ottiene una velocità di distacco di circa 18,15 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN 10 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

**GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19 m/s**

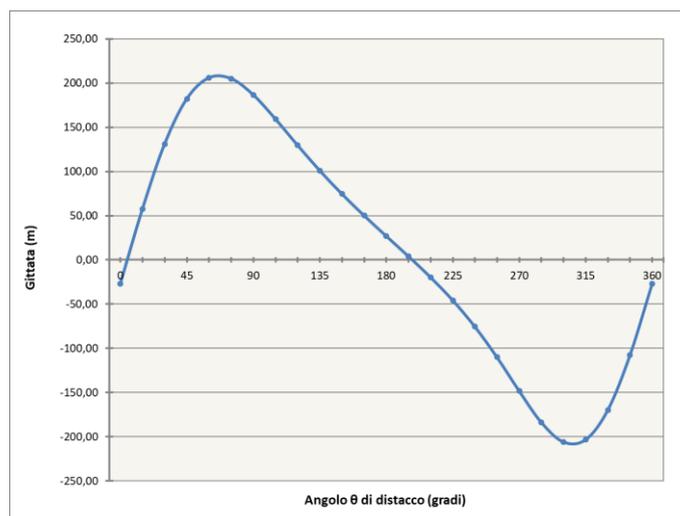


**Fig. 4.10 – gittata massima aerogeneratore CAN 10**

Per l'aerogeneratore 11 si ottiene una velocità di distacco di circa 34,19 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN 11 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

**GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19 m/s**

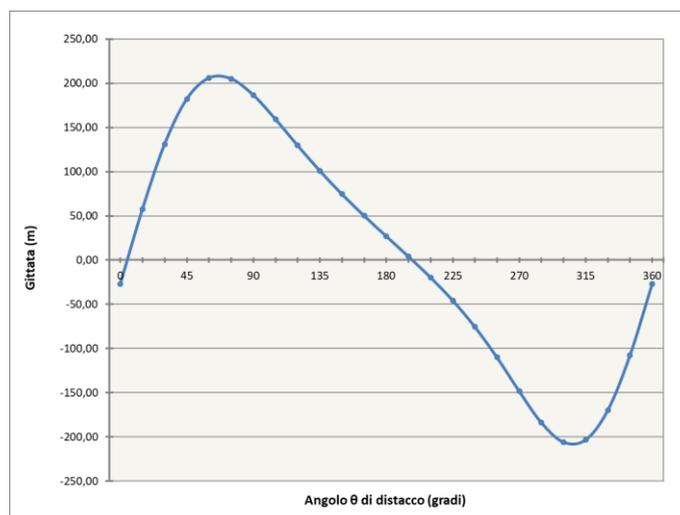


**Fig. 4.11 – gittata massima aerogeneratore CAN 11**

Per l'aerogeneratore 12 si ottiene una velocità di distacco di circa 34,19 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN 12 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

**GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19 m/s**

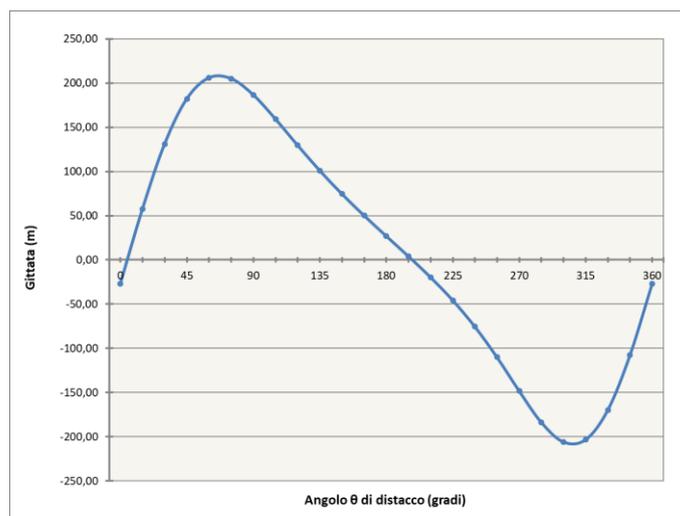


**Fig. 4.12 – gittata massima aerogeneratore CAN 12**

Per l'aerogeneratore 13 si ottiene una velocità di distacco di circa 34,19 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata per l'aerogeneratore CAN 13 in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

**GITTATA CON VELOCITÀ DI DISTACCO PARI A 34,19 m/s**



**Fig. 4.13 – gittata massima aerogeneratore CAN 13**

## 5. CONCLUSIONI

Nelle figure 4.1 – 4.13 si propone la gittata massima nel caso in cui si distacchi l'intera pala dal mozzo con una velocità di 18,15 m/s e 34,19 m/s, che costituisce la massima velocità raggiunta dal baricentro della pala allorché il rotore compie 12 rivoluzioni per minuto, la gittata massima è di circa 230,0 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 del 20%.

Avendo ottenuto la lunghezza di 230,0 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 gli aerogeneratori con distanza superiore a 230 m dagli edifici e dalle strade principali garantisce in caso di rottura accidentale, che non si possano determinare condizioni di pericolo per cose o persone.