

agsm aim  
Power

agsm aim

Progettazione:

agsm aim

MARCO GIUSTI



GRUPPO DI LAVORO:

NICOLA LONARDI  
LORENZO MASINI  
ANDREA PATUZZO  
FRANCESCO POSENATO  
ALBERTO RIZZI  
ANDREA SCALA  
ALESSANDRO TRINCO  
ALBERTO VENTURI

Assistenza alla Progettazione:

**iDea**  
INFRASTRUCTURE DESIGN, ENERGY AND ARCHITECTURE  
www.idea-eng.it - info@idea-eng.it

ANDREA BRUNELLI  
MASSIMO RAGNO  
MARCO SIGNORINI  
MAURIZIO SIMONINI

Geologia, geotecnica e sismica:



LUCA MONTI

ATTIVITA'

IMPIANTO EOLICO "CASONI DI ROMAGNA"  
COMUNI MONTERENZIO E CASTEL DEL RIO  
PROVINCIA DI BOLOGNA - REGIONE EMILIA ROMAGNA  
PROGETTO A CORREDO DELLO STUDIO PRELIMINARE AMBIENTALE

CONTENUTO

RELAZIONI  
RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA

Numero Attività

2023\_W\_067

Tipo Progetto

-

Tavola

RTC007-00

Revisione	Data	Oggetto revisione	Redatto	Verificato	Approvato	Scala
00	Luglio 2024	Emissione Progetto	SIGNORINI	SIGNORINI	GIUSTI	-
01						Località Casoni di Romagna
02						
03						Comune Monterenzio - Castel del Rio
04						

Questo disegno non può essere copiato o riprodotto senza autorizzazione, ogni violazione verrà perseguita a norma di legge.

---

**IMPIANTO EOLICO “CASONI DI ROMAGNA”**  
**COMUNI DI MONTERENZIO E CASTEL DEL RIO**  
**PROVINCIA DI BOLOGNA – REGIONE EMILIA ROMAGNA**  
**PROGETTO A CORREDO DELLO STUDIO PRELIMINARE**  
**AMBIENTALE**

**RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA**

---

## Sommario

<b>1.   PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.   CENNI TEORICI.....</b>	<b>4</b>
Ipotesi di calcolo .....	4
Calcolo della gittata .....	4
<b>3.   AEROGENERATORE ENERCON E138 – H81M .....</b>	<b>6</b>
Dati di calcolo .....	6
<b>4.   AEROGENERATORE ENERCON E138 – H99M .....</b>	<b>8</b>
Dati di calcolo .....	8
<b>5.   AEROGENERATORE GENERAL ELETTRIC GE137 – H81M .....</b>	<b>10</b>
Dati di calcolo .....	10
<b>6.   AEROGENERATORE GENERAL ELETTRIC GE137 – H99M .....</b>	<b>12</b>
Dati di calcolo .....	12
<b>7.   AEROGENERATORE VESTAS V136 – H81M .....</b>	<b>14</b>
Dati di calcolo .....	14
<b>8.   AEROGENERATORE VESTAS V136 – H99M .....</b>	<b>16</b>
Dati di calcolo .....	16
<b>9.   CONCLUSIONI CALCOLO DELLA GITTATA.....</b>	<b>18</b>
Considerazioni aggiuntive .....	18

---

## 1. PREMESSA

L'obiettivo della presente relazione è quello di fornire una stima della gittata massima che può essere raggiunta, in caso di distacco eccezionale, di un'intera pala di un aerogeneratore.

Il calcolo sarà eseguito con tre tipologie di aerogeneratori:

- Enercon E138;
- General Electric GE137;
- Vestas V136;

e, per ciascuno di essi, sia con l'altezza della torre di 81m sia di 99m.

Il calcolo della reale distanza raggiunta dalla pala risulta complesso a causa dell'influenza di un elevato numero di fattori per cui si è cercato di ottenere, mediante ipotesi semplificative e conservative, un valore di riferimento da cui ottenere poi un dato finale con correzioni che tenessero conto di elementi rilevanti per la stima della distanza massima.

In particolare, il calcolo è stato condotto individuando la gittata del centro di gravità della pala a partire dalle condizioni iniziali che determinano la massima gittata e con ipotesi semplificative relativamente agli effetti della resistenza e della portanza aerodinamica della corrente del vento.



---

## 2. CENNI TEORICI

### Ipotesi di calcolo

Per la stima della gittata massima si sono assunte le seguenti ipotesi di calcolo:

- Vengono trascurati gli effetti di portanza e resistenza della corrente del vento;
- La massa della pala è concentrata nel centro di gravità;
- Non intervengono moti di rotazione della pala durante il volo.

### Calcolo della gittata

Il moto della pala può essere descritto dalle seguenti equazioni del moto, assumendo un sistema di assi cartesiani con l'asse x coincidente con l'asse orizzontale alla base dell'aerogeneratore e l'asse y coincidente con l'asse verticale.

$$x(t) = x_0 + V_x \cdot t$$

$$y(t) = y_0 + V_y \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

dove:

-  $x_0$  rappresenta l'ascissa del centro di gravità all'istante iniziale del moto ed è assunta pari a:

$$x_0 = p \cdot \sin \beta$$

-  $V_x$  è la componente orizzontale della velocità ed è assunta pari a:

$$V_x = V_0 \cdot \cos \beta$$

-  $V_0$  è la velocità iniziale del centro di gravità rotante con velocità angolare  $\omega$ . Essa è assunta pari a:

$$V_0 = \omega \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot p$$

-  $y_0$  rappresenta l'ordinata del centro di gravità all'istante iniziale del moto ed è assunta pari a:

$$y_0 = p \cdot \cos \beta + h$$

-  $V_y$  è la componente verticale della velocità ed è assunta pari a:

$$V_y = V_0 \cdot \sin \beta - g \cdot t$$

-  $\beta$  è l'angolo formato dalla pala eolica rispetto la verticale.

Eliminando il parametro t dalle due equazioni si ottiene l'equazione del moto in direzione y:

$$y = y_0 + (x - x_0) \cdot \frac{\sin \beta}{\cos \beta} - \frac{1}{2} \cdot g \cdot \left( \frac{x - x_0}{V_0 \cdot \sin \beta} \right)^2$$

La gittata massima sarà data dalla risoluzione dell'equazione sopra ponendo y pari a 0.

La gittata massima è funzione dell'angolo  $\beta$  di gittata, perciò è necessario determinare l'angolo che massimizza la distanza raggiunta.

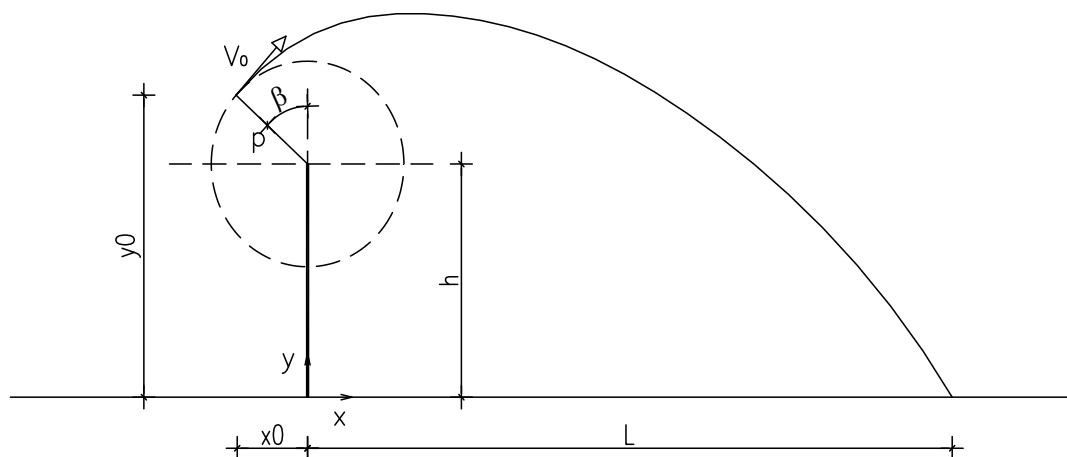


Figura 1: Schema di calcolo

Si riporta di seguito, per ciascun aerogeneratore e con altezza della torre da 81m e da 99m, il calcolo della massima gittata.

---

### 3. AEROGENERATORE ENERCON E138 – H81M

#### Dati di calcolo

##### Geometria della pala e dell'aerogeneratore

La geometria è quella di un aerogeneratore Enercon E138. In particolare:

- Lunghezza della pala ( $r$ ): 67.8m;
- Diametro del rotore ( $D$ ): 138.6m;
- Altezza della torre sull'asse di rotazione del rotore ( $h$ ): 81m.

##### Massa e centro di gravità della pala

La distribuzione della massa è stata ipotizzata tale da far corrispondere la posizione del centro di gravità a circa 1/3 della lunghezza della pala misurata dal punto di attacco al rotore.

- Distanza del centro di gravità della pala dall'asse di rotazione ( $p$ ): 20.91m

##### Velocità di rotazione

Nel calcolo si è assunta una velocità massima di rotazione pari a:

- Velocità di rotazione massima ( $\omega$ ): 11.10 r.p.m.

Nel caso in esame si ottiene:

- $p = 20.91\text{m}$ ;
- $h = 81\text{m}$ ;
- $\omega = 11.10 \text{ r.p.m.}$ ;
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ;
- $x_0 = -9.55\text{m}$ ;
- $y_0 = 101.48\text{m}$ ;
- $V_0 = 26.27\text{m/s}$ ;

Angolo per cui si ha la gittata massima ( $\beta$ ): **20°**

Gittata massima ( $L$ ): **117m**;

Tempo di volo: **5.07s**

Nella figura seguente si riporta l'andamento della gittata in funzione dell'angolo di gittata.

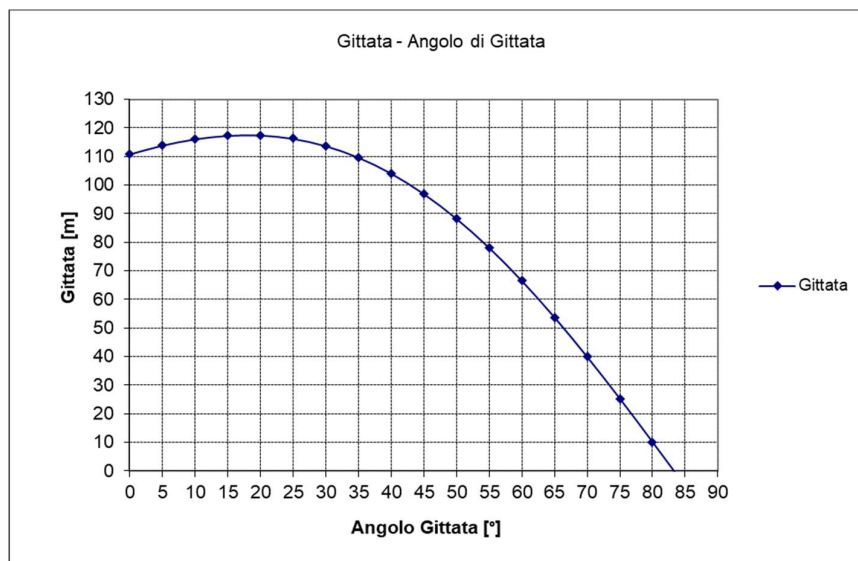


Figura 2: Gittata e angolo di gittata – Enercon E138 – Altezza torre 81m



---

## 4. AEROGENERATORE ENERCON E138 – H99M

### Dati di calcolo

#### Geometria della pala e dell'aerogeneratore

La geometria è quella di un aerogeneratore Enercon E138. In particolare:

- Lunghezza della pala ( $r$ ): 67.8m;
- Diametro del rotore ( $D$ ): 138.6m;
- Altezza della torre sull'asse di rotazione del rotore ( $h$ ): 99m.

#### Massa e centro di gravità della pala

La distribuzione della massa è stata ipotizzata tale da far corrispondere la posizione del centro di gravità a circa 1/3 della lunghezza della pala misurata dal punto di attacco al rotore.

- Distanza del centro di gravità della pala dall'asse di rotazione ( $p$ ): 20.91m

#### Velocità di rotazione

Nel calcolo si è assunta una velocità massima di rotazione pari a:

- Velocità di rotazione massima ( $\omega$ ): 11.10 r.p.m.

Nel caso in esame si ottiene:

- $p = 20.91\text{m}$ ;
- $h = 99\text{m}$ ;
- $\omega = 11.10 \text{ r.p.m.}$ ;
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ;
- $x_0 = -9.55\text{m}$ ;
- $y_0 = 119.48\text{m}$ ;
- $V_0 = 26.27\text{m/s}$ ;

Angolo per cui si ha la gittata massima ( $\beta$ ): **15°**

Gittata massima ( $L$ ): **126m**;

Tempo di volo: **5.21s**

Nella figura seguente si riporta l'andamento della gittata in funzione dell'angolo di gittata.

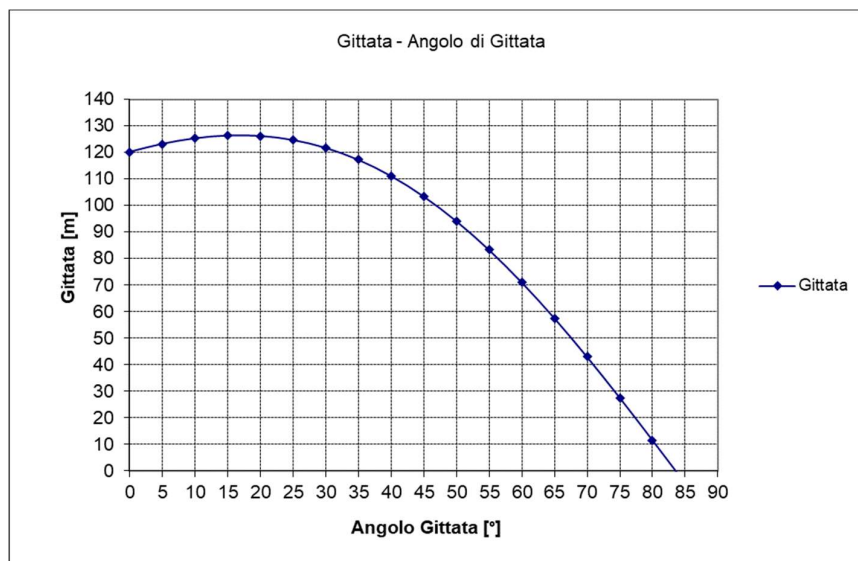


Figura 3: Gittata e angolo di gittata – Enercon E138 – Altezza torre 99m

---

## 5. AEROGENERATORE GENERAL ELETTRIC GE137 – H81M

### Dati di calcolo

#### Geometria della pala e dell'aerogeneratore

La geometria è quella di un aerogeneratore General Elettric GE137. In particolare:

- Lunghezza della pala ( $r$ ): 68.5m;
- Diametro del rotore ( $D$ ): 137m;
- Altezza della torre sull'asse di rotazione del rotore ( $h$ ): 81m.

#### Massa e centro di gravità della pala

La distribuzione della massa è stata ipotizzata tale da far corrispondere la posizione del centro di gravità a circa 1/3 della lunghezza della pala misurata dal punto di attacco al rotore.

- Distanza del centro di gravità della pala dall'asse di rotazione ( $p$ ): 22.83m

#### Velocità di rotazione

Nel calcolo si è assunta una velocità massima di rotazione pari a:

- Velocità di rotazione massima ( $\omega$ ): 13.90 r.p.m.

Nel caso in esame si ottiene:

- $p = 22.83\text{m}$ ;
- $h = 81\text{m}$ ;
- $\omega = 13.90 \text{ r.p.m.}$ ;
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ;
- $x_0 = -9.65\text{m}$ ;
- $y_0 = 101.69\text{m}$ ;
- $V_0 = 33.24\text{m/s}$ ;

Angolo per cui si ha la gittata massima ( $\beta$ ): **25°**

Gittata massima ( $L$ ): **177m**;

Tempo di volo: **6.20s**

Nella figura seguente si riporta l'andamento della gittata in funzione dell'angolo di gittata.

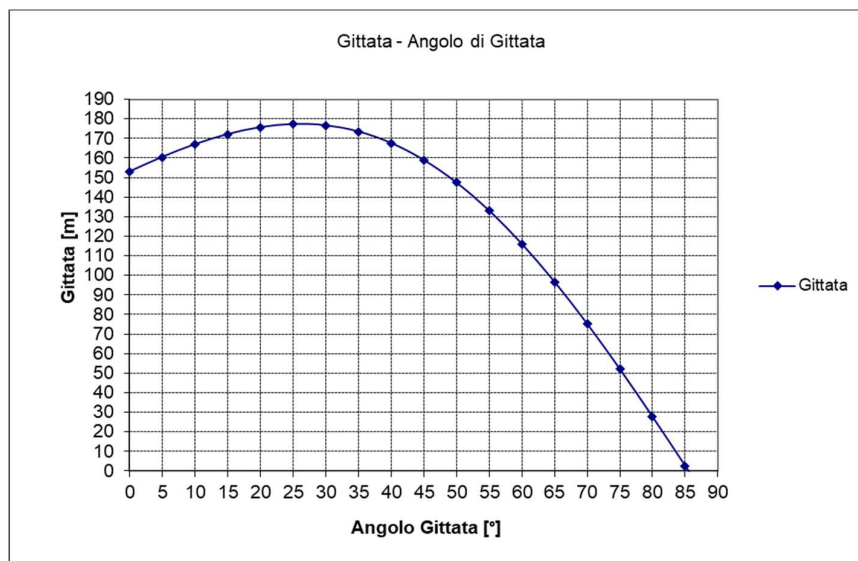


Figura 4: Gittata e angolo di gittata – General Elettric GE137 – Altezza torre 81m



---

## 6. AEROGENERATORE GENERAL ELETTRIC GE137 – H99M

### Dati di calcolo

#### Geometria della pala e dell'aerogeneratore

La geometria è quella di un aerogeneratore General Electric GE137. In particolare:

- Lunghezza della pala ( $r$ ): 68.5m;
- Diametro del rotore ( $D$ ): 137m;
- Altezza della torre sull'asse di rotazione del rotore ( $h$ ): 99m.

#### Massa e centro di gravità della pala

La distribuzione della massa è stata ipotizzata tale da far corrispondere la posizione del centro di gravità a circa 1/3 della lunghezza della pala misurata dal punto di attacco al rotore.

- Distanza del centro di gravità della pala dall'asse di rotazione ( $p$ ): 22.83m

#### Velocità di rotazione

Nel calcolo si è assunta una velocità massima di rotazione pari a:

- Velocità di rotazione massima ( $\omega$ ): 13.90 r.p.m.

Nel caso in esame si ottiene:

- $p = 22.83\text{m}$ ;
- $h = 99\text{m}$ ;
- $\omega = 13.90 \text{ r.p.m.}$ ;
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ;
- $x_0 = -9.65\text{m}$ ;
- $y_0 = 119.69\text{m}$ ;
- $V_0 = 33.24\text{m/s}$ ;

Angolo per cui si ha la gittata massima ( $\beta$ ): **25°**

Gittata massima ( $L$ ): **188m**;

Tempo di volo: **6.57s**

Nella figura seguente si riporta l'andamento della gittata in funzione dell'angolo di gittata.

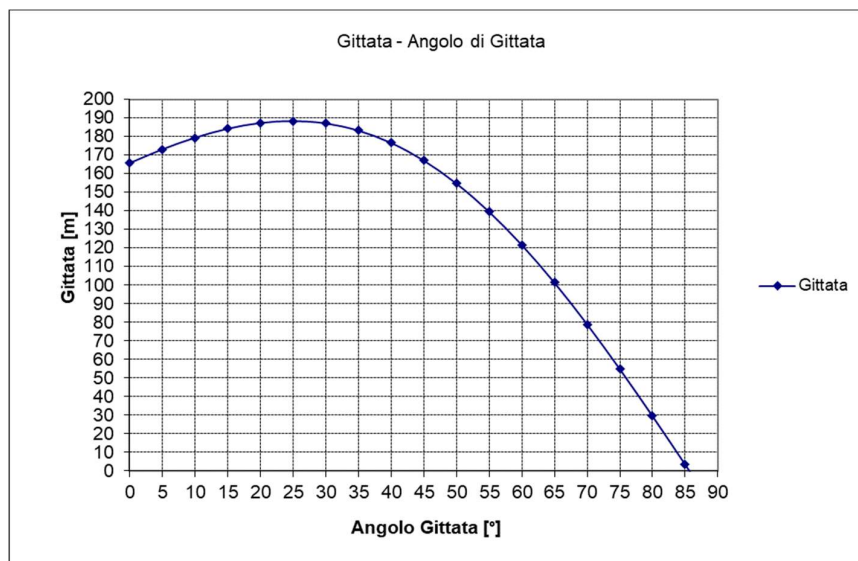


Figura 5: Gittata e angolo di gittata – General Elettric GE137 – Altezza torre 99m

---

## 7. AEROGENERATORE VESTAS V136 – H81M

### Dati di calcolo

#### Geometria della pala e dell'aerogeneratore

La geometria è quella di un aerogeneratore Vestas V136. In particolare:

- Lunghezza della pala ( $r$ ): 69.5m;
- Diametro del rotore ( $D$ ): 139m;
- Altezza della torre sull'asse di rotazione del rotore ( $h$ ): 81m.

#### Massa e centro di gravità della pala

La distribuzione della massa è stata ipotizzata tale da far corrispondere la posizione del centro di gravità a circa 1/3 della lunghezza della pala misurata dal punto di attacco al rotore.

- Distanza del centro di gravità della pala dall'asse di rotazione ( $p$ ): 23.17m

#### Velocità di rotazione

Nel calcolo si è assunta una velocità massima di rotazione pari a:

- Velocità di rotazione massima ( $\omega$ ): 14 r.p.m.

Nel caso in esame si ottiene:

- $p = 23.17\text{m}$ ;
- $h = 81\text{m}$ ;
- $\omega = 14 \text{ r.p.m.}$ ;
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ;
- $x_0 = -9.79\text{m}$ ;
- $y_0 = 102\text{m}$ ;
- $V_0 = 33.96\text{m/s}$ ;

Angolo per cui si ha la gittata massima ( $\beta$ ): **25°**

Gittata massima ( $L$ ): **183m**;

Tempo di volo: **6.25s**

Nella figura seguente si riporta l'andamento della gittata in funzione dell'angolo di gittata.

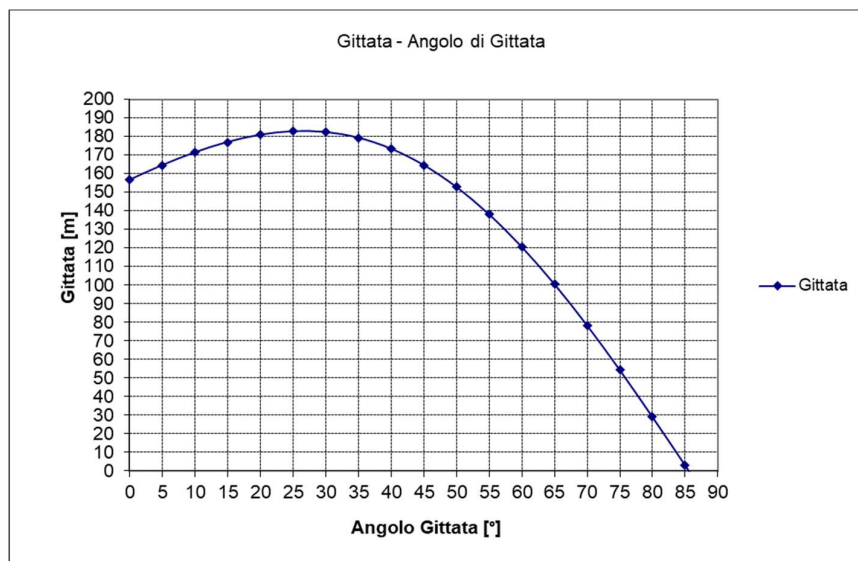


Figura 6: Gittata e angolo di gittata – Vestas V136 – Altezza torre 81m



---

## 8. AEROGENERATORE VESTAS V136 – H99M

### Dati di calcolo

#### Geometria della pala e dell'aerogeneratore

La geometria è quella di un aerogeneratore Vestas V136. In particolare:

- Lunghezza della pala ( $r$ ): 69.5m;
- Diametro del rotore ( $D$ ): 139m;
- Altezza della torre sull'asse di rotazione del rotore ( $h$ ): 99m.

#### Massa e centro di gravità della pala

La distribuzione della massa è stata ipotizzata tale da far corrispondere la posizione del centro di gravità a circa 1/3 della lunghezza della pala misurata dal punto di attacco al rotore.

- Distanza del centro di gravità della pala dall'asse di rotazione ( $p$ ): 23.17m

#### Velocità di rotazione

Nel calcolo si è assunta una velocità massima di rotazione pari a:

- Velocità di rotazione massima ( $\omega$ ): 14 r.p.m.

Nel caso in esame si ottiene:

- $p = 23.17\text{m}$ ;
- $h = 99\text{m}$ ;
- $\omega = 14 \text{ r.p.m.}$ ;
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ;
- $x_0 = -9.79\text{m}$ ;
- $y_0 = 120\text{m}$ ;
- $V_0 = 33.96\text{m/s}$ ;

Angolo per cui si ha la gittata massima ( $\beta$ ): **25°**

Gittata massima ( $L$ ): **194m**;

Tempo di volo: **6.62s**

Nella figura seguente si riporta l'andamento della gittata in funzione dell'angolo di gittata.

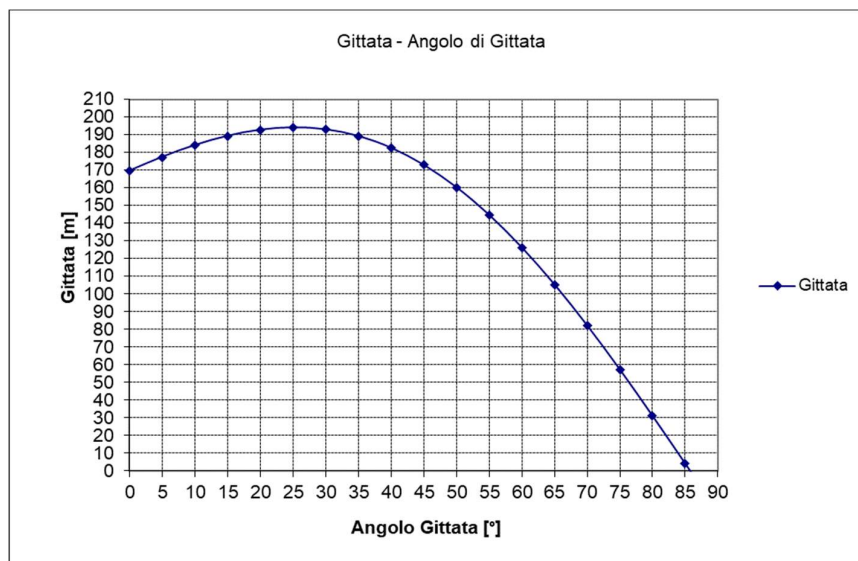


Figura 7: Gittata e angolo di gittata – Vestas V136 – Altezza torre 99m

---

## 9. CONCLUSIONI CALCOLO DELLA GITTATA

Si riportano di seguito le gittate calcolate:

- Aerogeneratore Enercon E138 – Altezza torre 81m	117m
- Aerogeneratore Enercon E138 – Altezza torre 99m	126m
- Aerogeneratore General Elettric GE137 – Altezza torre 81m	177m
- Aerogeneratore General Elettric GE137 – Altezza torre 99m	188m
- Aerogeneratore Vestas V136 – Altezza torre 81m	183m
- Aerogeneratore Vestas V136 – Altezza torre 99m	194m

### Considerazioni aggiuntive

Nella realtà l'impatto a terra della pala avverrà a distanze inferiori rispetto a quanto stimato in precedenza sia perché le condizioni iniziali al momento del distacco non necessariamente sono quelle che massimizzano la gittata sia perché i moti rotazionali della pala comporteranno ulteriori dissipazioni di energia e condizioni generalmente meno favorevoli per il moto. Si ritiene comunque necessario fare alcune considerazioni aggiuntive per tenere in conto di elementi che potrebbero incrementare la distanza sopra stimata. In particolare, la gittata massima è stata calcolata con riferimento alla posizione del centro di gravità della pala per cui alla grandezza calcolata sono da aggiungere circa 2/3 della lunghezza della pala nell'ipotesi che l'impatto a terra avvenga, per effetto delle rotazioni, di "piatto". Inoltre, si può ipotizzare che nella fase finale della caduta la pala si impunti su di un'estremità e ruoti attorno a questa per poi impattare a terra. In questo caso è necessario aggiungere al valore calcolato la lunghezza della pala. Infine, l'inerzia della pala in direzione parallela al moto può comportare un ulteriore incremento della distanza raggiunta. Per quanto sopra si ritiene necessario incrementare le stime delle gittate massime determinate in precedenza della lunghezza della pala.

Dalle stime condotte e dalle considerazioni aggiuntive si ricavano le seguenti distanze massime che possono essere raggiunte da una pala che si distacchi:

- Aerogeneratore Enercon E138 – Altezza torre 81m	185m
- Aerogeneratore Enercon E138 – Altezza torre 99m	194m
- Aerogeneratore General Elettric GE137 – Altezza torre 81m	246m
- Aerogeneratore General Elettric GE137 – Altezza torre 99m	257m
- Aerogeneratore Vestas V136 – Altezza torre 81m	252m
- Aerogeneratore Vestas V136 – Altezza torre 99m	24m

I risultati ottenuti sono inoltre riassunti nella tabella seguente.

---

<b>Aerogenerator e</b>	<b>Lunghezz a Pala</b> [m]	<b>Diametro rotore</b> [m]	<b>Distanza centro gravità (p)</b> [m]	<b>Velocità rotazione massima (<math>\omega</math>)</b> [r.p.m.]	<b>Altezza Torre (h)</b> [m]	<b>Gittata massima h=81</b> [m]	<b>Gittata massima h=99</b> [m]
<b>Enercon E138</b>	67.8	138.6	20.91	11.10	81-99	<b>185</b>	<b>194</b>
<b>General Elettric GE137</b>	68.5	137	22.83	13.90	81-99	<b>246</b>	<b>257</b>
<b>Vestas V136</b>	69.5	139	23.17	14.00	81-99	<b>252</b>	<b>264</b>

Infine, non si eseguono valutazioni e considerazioni in merito alla possibilità di proiezioni di porzioni della pala all'impatto a terra.