

# REGIONI PUGLIA e CAMPANIA

Province di Foggia e Avellino

COMUNI DI Greci (AV) – Montaguto (AV) – Faeto (FG) –  
Celle di San Vito (FG) – Orsara (FG)-Castelluccio  
Valmaggiore (FG) – Troia (FG)

PROGETTO

## POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO



### PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE:

*ERG Wind 4*



PROGETTISTA:



**GOLDER**  
Via Sante Bargellini, 4  
00157 - Roma (RM)



OGGETTO DELL'ELABORATO:

### RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI

CODICE PROGETTISTA	DATA	SCALA	FOGLIO	FORMATO	CODICE DOCUMENTO				
					IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.
	04/2019	/	1 di 19	A4	GRE	ENG	REL	0009	00

NOME FILE: GRE.ENG.REL.09.00\_Relazione gittata massima elementi rotanti.doc

ERG Wind 4 2 S.r.l. si riserva tutti i diritti su questo documento che non può essere riprodotto neppure parzialmente senza la sua autorizzazione scritta.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	2
<b>GRE</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0009</b>	<b>00</b>		

Storia delle revisioni del documento

REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
00	04/2019	PRIMA EMISSIONE	MGL	LSP	VBR

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	3
GRE	ENG	REL	0009	00		

## INDICE

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>4</b>
<b>2. STORICO DEGLI INCIDENTI.....</b>	<b>7</b>
<b>3. CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE .....</b>	<b>8</b>
<b>4. SPECIFICHE DELL'AEROGENERATORE .....</b>	<b>9</b>
<b>5. ROTTURA PALA .....</b>	<b>10</b>
<b>5.1. FATTORI CHE INFLUENZANO LA GITTATA.....</b>	<b>10</b>
<b>5.2. MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO .....</b>	<b>11</b>
<b>5.3. ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE .....</b>	<b>12</b>
<b>6. CONCLUSIONI .....</b>	<b>19</b>

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	4
GRE	ENG	REL	0009	00		

## 1. PREMESSA

La società Golder è stata incaricata di redigere il progetto relativo al potenziamento di due impianti eolici esistenti con aerogeneratori ubicati nei comuni di Greci (AV) e di Montaguto (AV) in Regione Campania. Le relative opere di connessione si sviluppano, oltre che nei suddetti comuni, anche nei comuni di Faeto (FG), Orsara di Puglia (FG), Celle San Vito (FG), Castelluccio Valmaggiore (FG) e Troia (FG), in Regione Puglia.

Sebbene attualmente gli impianti siano entrambi connessi presso l'esistente stazione elettrica di trasformazione 150/20 kV "Celle San Vito", ubicata nel Comune di Celle San Vito (FG), al termine degli interventi di repowering i due impianti si collegheranno a due diverse sottostazioni elettriche: gli aerogeneratori ricadenti nel Comune di Greci verranno collegati alla SSE "Troia" 380/150 kV, presente nel comune di Troia (FG), mentre quelli realizzati nel territorio di Montaguto conserveranno l'attuale collegamento alla SSE di Celle San Vito, adeguando quest'ultima alla nuova potenza dell'impianto ed alle specifiche tecniche previste dal codice di rete.

Gli impianti esistenti sono di proprietà della società del Gruppo ERG Wind 4 Holding Italia Srl.

Nello specifico, gli impianti di Greci e Montaguto sono composti da aerogeneratori tripala modello Vestas V-47, con torre tralicciata, ciascuno di potenza nominale pari a 0,66 MW.

L'impianto di Greci risulta costituito da 25 aerogeneratori, per una potenza complessiva di 16,5 MW, mentre l'impianto di Montaguto è composto da 10 aerogeneratori per una potenza complessiva di 6,60 MW. Entrambi gli impianti, attualmente in esercizio, sono collegati tramite cavidotti interrati all'esistente stazione elettrica di Celle San Vito.

Il potenziamento dei due impianti sarà portato in autorizzazione come un unico impianto.

Il presente progetto consisterà dunque in:

- dismissione di 22 dei 25 aerogeneratori esistenti dell'impianto di Greci (potenza in dismissione pari a 14,52 MW) e di tutti i 10 aerogeneratori dell'impianto di Montaguto (potenza in dismissione pari a 6,60 MW) e delle relative opere accessorie, oltre che nella rimozione dei cavidotti attualmente in esercizio. Resteranno in esercizio esclusivamente tre aerogeneratori dell'impianto di Greci, individuati dalle sigle GR11, GR12 e GR13, caratterizzati da una connessione in antenna, separata rispetto al resto delle macchine di impianto, che saranno sottoposti ad un intervento di reblading seguendo un iter autorizzativo separato. Il numero complessivo degli aerogeneratori da dismettere, pertanto, è pari a 32 per una potenza complessiva in dismissione pari a 21,12 MW.
- Realizzazione nelle stesse aree di un nuovo impianto eolico costituito da 10 aerogeneratori di grande taglia e relative opere accessorie per una potenza complessiva di 43,8 MW. In particolare, l'impianto sarà costituito da:

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	5
<b>GRE</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0009</b>	<b>00</b>		

- n.6 aerogeneratori nel territorio comunale di Greci, della potenza unitaria di 4,5 MW (per una potenza complessiva di 27 MW), diametro del rotore massimo di 145 m ed altezza massima complessiva di 180 m;
- n.4 aerogeneratori nel territorio comunale di Montaguto, della potenza unitaria di 4,2 MW (per una potenza complessiva di 16,8 MW), diametro del rotore massimo di 117 m e altezza massima complessiva di 180 m.
- La costruzione di nuovi cavidotti interrati MT in sostituzione di quelli attualmente in esercizio. Il tracciato di progetto, completamente interrato, seguirà per la maggior parte il percorso esistente. L'unica eccezione riguarderà il nuovo tracciato necessario per il collegamento degli aerogeneratori di Greci alla SSE utente di nuova realizzazione nel Comune di Troia.
- L'adeguamento della sottostazione elettrica esistente di Celle San Vito alla nuova configurazione elettrica ed alle specifiche di rete, per garantire la connessione alla RTN degli aerogeneratori di Montaguto.
- La realizzazione di una nuova cabina di sezionamento lungo il tracciato dei cavidotti MT che collegano l'impianto di Greci alla nuova sottostazione, in modo da garantire maggiore facilità nella manutenzione delle linee e ridurre le perdite elettriche.
- La costruzione di una nuova sottostazione elettrica utente per la connessione alla RTN degli aerogeneratori di Greci. La SSE di progetto rappresenterà il punto di arrivo dei cavi MT e di partenza del cavo di collegamento AT verso la sottostazione Terna esistente.
- La posa di un nuovo cavidotto interrato AT tra la sottostazione lato utente e la SSE Terna esistente.
- L'adeguamento della sottostazione elettrica Terna esistente in cui avverrà il collegamento degli impianti (tale intervento non compreso nel presente progetto).

L'installazione di pochi ma più moderni aerogeneratori in sostituzione di diverse turbine di vecchissima concezione comporterà non solo un incremento dei rendimenti energetici degli impianti, ma anche un considerevole miglioramento degli impatti ambientali connessi a questo tipo di installazioni.

Inoltre, l'incremento di efficienza delle turbine previste rispetto a quelle in esercizio porterà ad un ampliamento del tempo di generazione ed un aumento della produzione unitaria media.

La presente relazione tecnica specialistica ha come oggetto la valutazione della gittata massima degli elementi rotanti, al fine di identificare i potenziali rischi per le attività umane o le abitazioni presenti nelle vicinanze degli aerogeneratori.

Come per tutte le attività umane, esistono rischi legati alla esistenza e al funzionamento del parco eolico per coloro che abitano nelle immediate vicinanze. I rischi potenziali sono dovuti alla presenza di

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	6
<b>GRE</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0009</b>	<b>00</b>		

componenti pesanti e in movimento e alla vicinanza di linee elettriche in media tensione.

L'analisi condotta consiste nello stimare l'impatto che può avere la rottura dell'organo rotante di una torre eolica, con conseguente distacco e lancio di una pala. Tutte le analisi qui effettuate non tengono conto degli effetti di portanza aerodinamica sulle pale, ma unicamente degli effetti gravitazionali. Gli studi condotti hanno tuttavia dimostrato che questa approssimazione rispecchia piuttosto bene ciò che avviene nella realtà.

L'analisi per la combinazione dei carichi, per i materiali usati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura si fa riferimento alla norma CEI EN61400-1.

In qualsiasi caso, la gittata massima e la velocità all'impatto sono dei fattori determinanti per la stima del rischio. La gittata massima dipende dal prodotto tra il raggio della pala e la velocità di rotazione del mozzo.

Il calcolo presenta comunque alcune complessità in quanto le variabili in gioco sono numerose ed il risultato può essere soltanto di tipo probabilistico in quanto legato alle modalità ed al momento del distacco. Infatti, un corpo lanciato in aria in presenza di forte vento potrebbe dar luogo ad effetti di "portanza" che possono prolungare i tempi di volo. L'effetto viscoso dell'aria, d'altra parte, ha un effetto opposto frenando il corpo stesso. Considerando, quindi, la natura della pala avente un profilo aerodinamico, lo studio del moto risulta complesso, a causa di tutte le forze e dei momenti che nascono al momento del distacco e nell'interazione col vento.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	7
<b>GRE</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0009</b>	<b>00</b>		

## 2. STORICO DEGLI INCIDENTI

È da sottolineare comunque che nell'ultimo decennio, il tasso d'incidentalità è ancora diminuito a seguito dell'evoluzione tecnologica e del miglioramento delle macchine eoliche, malgrado l'aumento medio delle loro dimensioni.

Uno studio danese ha condotto su 18 mesi, tra il 1998 e i 1999, un'analisi riguardante le pale, le navicelle e le torri di 2.130 rotori, per una produzione complessiva di 540 MW. Su 3.195 anni cumulati di funzionamento, solo 7 incidenti hanno comportato la distruzione delle pale. Il tasso è dunque di un incidente ogni 457 anni-macchina. Si noti che la Danimarca presenta maggiori rischi di guasti e di sospensione della produzione a causa della presenza di brina e di ghiaccio.

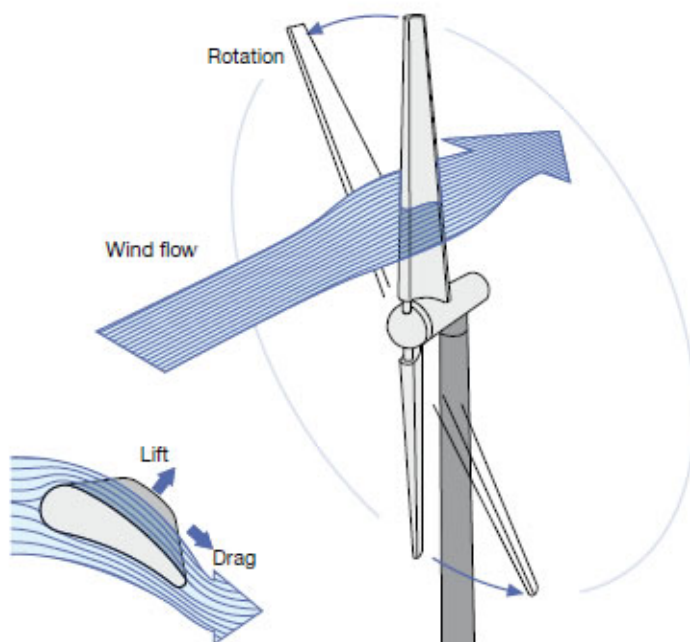
Un altro studio danese a partire da dati registrati su 120 mesi tra il 1993 e il 2003 in un parco di 1.912 impianti mostra una probabilità di distruzione di 0,00083 impianti per anno. In ambito rurale, la correlazione di questa statistica ( $6 \times 10^{-5}$ /anno) con la probabilità di occupazione di un m<sup>2</sup> di terreno da parte di una persona individua una probabilità globale di ferire qualcuno molto bassa.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	8
GRE	ENG	REL	0009	00		

### 3. CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

Le pale di un aerogeneratore sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore. Vi è un sistema di controllo aerodinamico, chiamato imbardata, che permette il controllo della potenza ruotando le pale intorno al loro asse principale, modificando l'orientamento rispetto alla direzione del vento, per offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo, indipendentemente dalla direzione del vento, un verso orario di rotazione.

Si riporta di seguito una figura esemplificativa che evidenzia il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento.



**Figura 1- Relazione tra direzione del vento e rotazione delle pale**

Questa considerazione servirà per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale e a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano.

Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva che individua la direzione del moto del corpo che si distacca. Mettendo in relazione tale traiettoria con la corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può rappresentare un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.



CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	9
GRE	ENG	REL	0009	00		

#### 4. SPECIFICHE DELL'AEROGENERATORE

Per le valutazioni contenute all'interno della presente relazione è stato considerato un modello di aerogeneratore con le caratteristiche geometriche riportate nella tabella seguente.

In fase esecutiva verrà individuato un modello di macchina tra quelli commercialmente disponibili, con caratteristiche geometriche conformi ai valori considerati.

**Tabella 1 – Specifiche tecniche degli aerogeneratori**

Parametri aerogeneratori						
Sito	Diametro [m]	Area spazzata [m <sup>2</sup> ]	Velocità rotazione [rpm]	N°pale	Altezza hub [m]	V <sub>cut-out</sub> [m/s]
Greci	145	16513	14,1	3	112	26
Montaguto	117	10751	14,1	3	121,5	25

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	10
GRE	ENG	REL	0009	00		

## 5. ROTTURA PALA

Le modalità di rottura della pala possono essere assai diverse. Essendo un organo in rotazione è soggetto alla forza centripeta che va equilibrata con l'azione della struttura della torre stessa. Per minimizzare tale forza, la pala è costruita in materiale leggero; normalmente si utilizzano materiali compositi che sfruttano le caratteristiche meccaniche così da far fronte ai carichi aerodinamici imposti.

### 5.1. FATTORI CHE INFLUENZANO LA GITTATA

Da un punto di vista teorico, non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore si avrebbe nel caso di distacco in corrispondenza della posizione palare pari a 45 gradi e di moto a "giavellotto" della pala distaccata. Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di un moto a giavellotto è praticamente impossibile: le forze di resistenza viscosa, le azioni resistive del vento ed il moto di rotazione complesso dovuto al profilo aerodinamico della pala si oppongono al moto e riducono il tempo e la distanza di volo.

La traiettoria iniziale della pala distaccata è determinata principalmente dall'angolo in corrispondenza del quale avviene il distacco e dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia. Per quanto riguarda le forze di tipo aerodinamico e relativi momenti, queste agiranno sulla pala influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

Il lasso di tempo impiegato dalla pala per raggiungere il suolo, che indicheremo come tempo di volo, generalmente è correlato:

- alla componente verticale della velocità iniziale posseduta dalla pala immediatamente dopo il distacco, in corrispondenza del suo punto baricentrico;
- alla posizione rispetto al suolo;
- all'accelerazione verticale;
- alle forze di attrito agenti sulla pala stessa.

Il tempo di volo dedotto da tali considerazioni successivamente è stato impiegato per il calcolo della distanza.

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è dipendente:

- dalla componente orizzontale della velocità della pala immediatamente dopo il distacco;
- dalla velocità del vento nel momento del distacco;
- dalle forze di attrito agenti sulla pala in volo;
- dal tempo di volo.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	11
GRE	ENG	REL	0009	00		

## 5.2. MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO

Il moto reale della parte distaccata risulta molto complesso, poiché dipendente, come detto, dalle caratteristiche aerodinamiche di questa e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala). I casi puramente teorici di rottura e di volo con moto “a giavellotto” sono da ritenere, come accennato, poco realistici data la complessità aerodinamica della pala e la presenza dell'azione del vento. Il modello teorico che meglio caratterizza il moto delle parti che hanno subito il distacco, e che più si avvicina al caso reale, è il modello “Complex Rotational Motion”, che permette di studiare il moto nel suo complesso, considerando i moti di rotazione intorno agli assi  $xx$ ,  $yy$ ,  $zz$ .

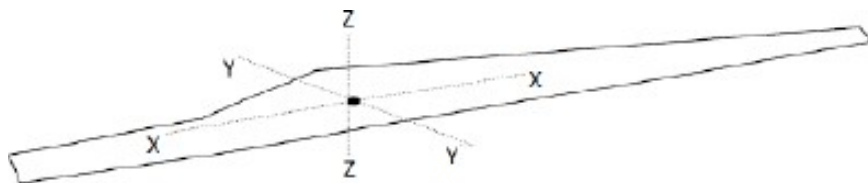


Figura 2 – Assi di rotazione della pala

La rotazione della pala intorno all'asse  $zz$  è causata dalla conservazione del momento della quantità di moto: in caso di rottura, per il principio di conservazione, il generico spezzone tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano. La rotazione intorno agli altri assi è dovuta alle azioni indotte dal vento incidente out of plane sulla pala. In particolare, si genera un momento intorno all'asse  $yy$ , caratterizzato dal disallineamento tra centro di massa e centro aerodinamico della pala. La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di distacco/lancio e dalle forze inerziali agenti sulla pala: al momento del distacco, oltre all'impulso, agiscono anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise. Pertanto, il moto della parte distaccata sarà un moto rotazionale, su cui agisce anche la forza di gravità. La resistenza offerta dalla pala al moto sia *in plane* che *out plane* è generata dalla rotazione intorno agli assi  $xx$  e  $yy$ .

La massima gittata della pala è strettamente dipendente:

- dal numero di giri del rotore e quindi dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;
- dalla posizione della pala nel momento del distacco;
- dalla dimensione della pala;
- dal peso della pala (più leggera è, più il suo moto è limitato dalle forze di attrito viscoso);
- dal profilo aerodinamico della pala.

Si può dunque concludere che:

- effettuando un calcolo che tenga conto dei valori cinematici e geometrici del moto senza considerare gli effetti viscosi e soprattutto la complessità del moto rotazionale, si ottengono

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	12
GRE	ENG	REL	0009	00		

valori di gittata più elevati di quelli riscontrabili nella realtà;

- più che dalle dimensioni dell'aerogeneratore e dell'altezza della torre, i valori della gittata dipendono dalla velocità di rotazione del mozzo.

### 5.3. ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE

La rottura della pala alla radice è un evento che storicamente è risultato frequente (rispetto al numero di rotture totali) in quanto la sezione di attacco risulta assai "critica" dal punto di vista strutturale.

Le cause sono sostanzialmente due:

1. la discontinuità della struttura che passa da un carico distribuito sulle fibre alla flangia di attacco crea inevitabili concentrazioni tensionali che con l'andare del tempo può creare problemi di affaticamento con conseguente rottura. C'è da dire che i costruttori hanno ben chiaro il problema e che negli ultimi anni si sono introdotti diversi accorgimenti che hanno migliorato di molto le prestazioni.
2. la rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo. Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni serrati opportunamente durante l'installazione della turbina.

Il precarico conferito ai bulloni durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei bulloni stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

L'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono determinare la rottura per fatica dei bulloni ed al distacco della pala.

Per la stima della gittata massima dell'intera pala si impongono alcune ipotesi semplificative:

1. distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;
2. baricentro posizionato ad 1/3 della lunghezza della pala;
3. assenza di attriti viscosi durante il volo: questa ipotesi risulta conservativa considerando che in letteratura si registra, a causa degli effetti di attrito, una diminuzione del tempo di volo anche del 20 %;
4. distacco in corrispondenza di un angolo di 315° rispetto alla verticale, che dal punto di vista teorico garantisce la massima gittata (moto in senso orario);
5. distacco alla rotazione di funzionamento massima;
6. vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
7. assenza di effetti di "portanza" del profilo alare.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	13
GRE	ENG	REL	0009	00		

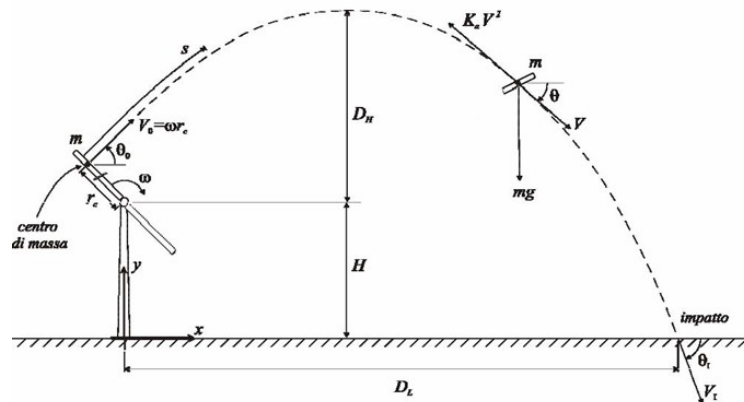


Figura 3 – Traiettoria della pala

### Equazioni del moto applicate

Le equazioni del moto di un punto materiale soggetto solo alla forza di gravità sono:

$$\ddot{x} = 0$$

$$\ddot{y} = -g$$

dove  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  è l'accelerazione di gravità.

La legge del moto, soluzione di queste equazioni è:

$$x(t) = x_0 + v_x t$$

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

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 (tempo di volo) tale che  $Y(T)=0$ . Dalla legge del moto si ottiene

$$T = \frac{v_y}{g} + \frac{\sqrt{v_y^2 + 2 y_0 g}}{g} \quad [s]$$

scartando la soluzione corrispondente a tempi negativi.

Consideriamo dunque il moto bidimensionale dell'elemento rotante come il moto di un punto materiale concentrato nel baricentro, 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. 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  $2\pi$

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	14
GRE	ENG	REL	0009	00		

radianti, per n giri avremo  $2 \cdot \pi \cdot n \text{ rad/min} \frac{\text{rad}}{\text{min}}$ , che è appunto la velocità angolare  $\omega$  del corpo in movimento. Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

Prendendo come riferimento le pale della macchina di Greci e considerando le caratteristiche geometriche delle pale stesse, oltre che la distribuzione dei pesi lungo il loro profilo, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ad una distanza dal centro di rotazione pari a circa  $r_g = 23,67 \text{ m}$ , essendo il diametro del rotore  $D = 145 \text{ m}$  ed il raggio di ciascuna pala  $R = 71 \text{ m}$  circa.

Per determinare la velocità del baricentro della pala basta moltiplicare la distanza del baricentro dal centro di rotazione per la velocità angolare. Il numero di giri valutato per questa analisi è pari a 14,1 rpm. Per questa velocità angolare, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$v_g = \omega r_g = 34,34 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

La posizione e la velocità iniziale dipendono, oltre che dalla velocità tangenziale appena calcolata, anche dall'angolo  $\theta$  che pala forma con l'orizzontale al momento del distacco, valutato in senso orario. Le relazioni che legano la posizione iniziale all'angolo della pala sono le seguenti:

$$x_0 = -r_g \cos\theta$$

$$y_0 = H + r_g \sin\theta$$

mentre per la velocità:

$$v_x = v_g \sin\theta$$

$$v_y = v_g \cos\theta$$

La gittata, che indichiamo con L, è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo della pala; l'altezza H è l'altezza del mozzo della torre. Dalla legge del moto otteniamo:

$$L = x(T)$$

Sostituendo l'espressione del tempo di volo T all'interno della legge di moto, otteniamo la gittata L in funzione di  $V_g$  e di  $\theta$ :

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV.	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	15
GRE	ENG	REL	0009	00		

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

Nella formula per la gittata sopra riportata, si assumono i seguenti dati:

- $v_g=34,94$  m/s;
- $r_g=23,67$  m/s;
- $g=9,81$  m/s<sup>2</sup>;
- $H=112$  m.

Fissati tali parametri, il valore della gittata dipenderà dall'angolo  $\theta$

Si noti che fissato un generico angolo  $\theta$ , la gittata aumenta quadraticamente con  $V_g$  salvo i casi particolari  $\theta = \pm 90^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 180^\circ$ , nei quali la gittata aumenta linearmente con  $V$  oppure è pari a  $r_g$ .

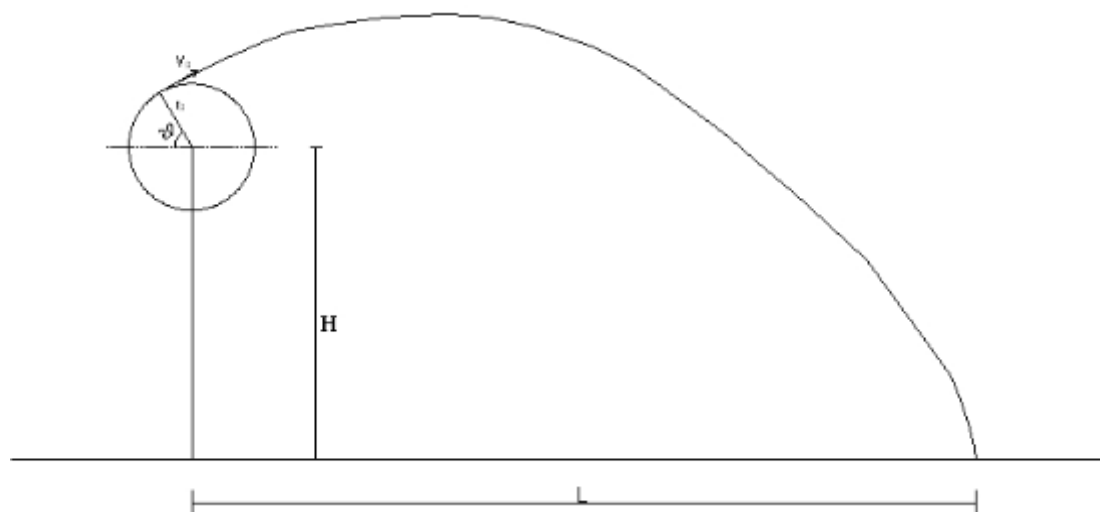


Figura 4 – Gittata della pala in funzione dell'angolo  $\theta$ .

Come si evidenzia dal grafico e numericamente dalla tabella sotto riportata il valore massimo della gittata è pari a 209,62 m circa con un angolo di distacco di circa  $\theta = \pi/3$  rad, più precisamente pari a  $65^\circ$ . A tale valore dovrà aggiungersi la distanza tra il vertice della pala e il suo baricentro, pari a 44,33 m, per un valore complessivo della gittata di 256,95 m.

A seguire si riportano gli andamenti grafici della gittata in funzione dell'angolo di gittata, oltre che ai risultati analitici in forma tabellare.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO										PAGINA	
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO GRECO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI										16	
GRE	ENG	REL	0009	00												

Tabella 2 – Gittata al variare dell'angolo  $\theta$  per l'aerogeneratore di Greci

$\theta$ [°]	$\theta$ [rad]	H [m]	R [m]	$r_g$ [m]	n [-]	$\omega$ [rad/s]	$v_g$ [m/s]	$x_0$ [m]	$v_x$ [m/s]	$y_0$ [m]	$v_y$ [m/s]	$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	T [s]	L(T) [m]	$r_{g-tip}$ [m]	$L_{tot}$ [m]
1	0,02	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-23,7	0,61	112,41	34,94	9,81	9,53	-17,85	47,33	29,48
5	0,09	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-23,6	3,05	114,06	34,81	9,81	9,54	5,47	47,33	52,80
10	0,17	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-23,3	6,07	116,11	34,41	9,81	9,51	34,38	47,33	81,71
15	0,26	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-22,9	9,04	118,13	33,75	9,81	9,43	62,47	47,33	109,80
20	0,35	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-22,2	11,95	120,09	32,84	9,81	9,32	89,17	47,33	136,50
25	0,44	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-21,4	14,77	122,00	31,67	9,81	9,17	113,97	47,33	161,30
30	0,52	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-20,5	17,47	123,83	30,26	9,81	8,98	136,42	47,33	183,76
35	0,61	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-19,4	20,04	125,57	28,63	9,81	8,76	156,17	47,33	203,51
40	0,70	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-18,1	22,46	127,21	26,77	9,81	8,51	172,94	47,33	220,28
45	0,79	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-16,7	24,71	128,73	24,71	9,81	8,23	186,57	47,33	233,90
50	0,87	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-15,2	26,77	130,13	22,46	9,81	7,93	196,97	47,33	244,31
55	0,96	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-13,6	28,63	131,39	20,04	9,81	7,61	204,19	47,33	251,52
60	1,05	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-11,8	30,26	132,50	17,47	9,81	7,28	208,34	47,33	255,67
65	1,13	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-10,0	31,67	133,45	14,77	9,81	6,93	209,62	47,33	256,95
70	1,22	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-8,1	32,84	134,24	11,95	9,81	6,59	208,30	47,33	255,63
75	1,31	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-6,1	33,75	134,86	9,04	9,81	6,25	204,70	47,33	252,03
80	1,40	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-4,1	34,41	135,31	6,07	9,81	5,91	199,18	47,33	246,51
85	1,48	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	-2,1	34,81	135,58	3,05	9,81	5,58	192,09	47,33	239,42
90	1,57	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	0,0	34,94	135,67	0,00	9,81	5,26	183,78	47,33	231,11
95	1,66	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	2,1	34,81	135,58	-3,05	9,81	4,96	174,60	47,33	221,93
100	1,75	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	4,1	34,41	135,31	-6,07	9,81	4,67	164,82	47,33	212,15
105	1,83	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	6,1	33,75	134,86	-9,04	9,81	4,40	154,71	47,33	202,04
110	1,92	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	8,1	32,84	134,24	-11,95	9,81	4,15	144,47	47,33	191,81
115	2,01	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	10,0	31,67	133,45	-14,77	9,81	3,92	134,26	47,33	181,60
120	2,09	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	11,8	30,26	132,50	-17,47	9,81	3,71	124,20	47,33	171,53
125	2,18	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	13,6	28,63	131,39	-20,04	9,81	3,52	114,37	47,33	161,70
130	2,27	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	15,2	26,77	130,13	-22,46	9,81	3,35	104,81	47,33	152,14
135	2,36	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	16,7	24,71	128,73	-24,71	9,81	3,19	95,56	47,33	142,89
140	2,44	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	18,1	22,46	127,21	-26,77	9,81	3,05	86,61	47,33	133,95
145	2,53	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	19,4	20,04	125,57	-28,63	9,81	2,92	77,97	47,33	125,31
150	2,62	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	20,5	17,47	123,83	-30,26	9,81	2,81	69,61	47,33	116,95
155	2,71	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	21,4	14,77	122,00	-31,67	9,81	2,71	61,51	47,33	108,84
160	2,79	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	22,2	11,95	120,09	-32,84	9,81	2,63	53,63	47,33	100,97
165	2,88	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	22,9	9,04	118,13	-33,75	9,81	2,55	45,95	47,33	93,28
170	2,97	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	23,3	6,07	116,11	-34,41	9,81	2,49	38,42	47,33	85,75
175	3,05	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	23,6	3,05	114,06	-34,81	9,81	2,44	31,00	47,33	78,34
180	3,14	112	71	23,67	14,1	1,48	34,94	23,7	0,00	112,00	-34,94	9,81	2,40	23,67	47,33	71,00



CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO										PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO GRECO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI										17
GRE	ENG	REL	0009	00											

Tabella 3 – Gittata al variare dell'angolo  $\theta$  per l'aerogeneratore di Montaguto

$\theta$ [°]	$\theta$ [rad]	H [m]	R [m]	$r_g$ [m]	n [-]	$\omega$ [rad/s]	$v_g$ [m/s]	$x_0$ [m]	$v_x$ [m/s]	$y_0$ [m]	$v_y$ [m/s]	$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	T [s]	L(T) [m]	$r_{g-tip}$ [m]	$L_{tot}$ [m]
1	0,02	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-20,4	0,51	121,86	29,00	9,81	8,75	-15,93	38,13	22,20
5	0,09	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-20,3	2,53	123,28	28,90	9,81	8,76	1,86	38,13	39,99
10	0,17	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-20,1	5,04	125,04	28,57	9,81	8,74	23,97	38,13	62,10
15	0,26	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-19,7	7,51	126,77	28,02	9,81	8,69	45,54	38,13	83,68
20	0,35	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-19,1	9,92	128,47	27,26	9,81	8,60	66,20	38,13	104,33
25	0,44	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-18,5	12,26	130,11	26,29	9,81	8,49	85,56	38,13	123,69
30	0,52	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-17,6	14,50	131,68	25,12	9,81	8,34	103,32	38,13	141,45
35	0,61	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-16,7	16,64	133,18	23,76	9,81	8,17	119,21	38,13	157,35
40	0,70	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-15,6	18,64	134,59	22,22	9,81	7,97	133,03	38,13	171,17
45	0,79	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-14,4	20,51	135,90	20,51	9,81	7,75	144,65	38,13	182,78
50	0,87	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-13,1	22,22	137,10	18,64	9,81	7,52	153,97	38,13	192,11
55	0,96	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-11,7	23,76	138,18	16,64	9,81	7,27	161,01	38,13	199,14
60	1,05	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-10,2	25,12	139,14	14,50	9,81	7,01	165,80	38,13	203,93
65	1,13	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-8,6	26,29	139,96	12,26	9,81	6,74	168,46	38,13	206,59
70	1,22	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-7,0	27,26	140,64	9,92	9,81	6,46	169,13	38,13	207,26
75	1,31	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-5,3	28,02	141,17	7,51	9,81	6,18	168,00	38,13	206,13
80	1,40	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-3,5	28,57	141,56	5,04	9,81	5,91	165,29	38,13	203,42
85	1,48	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	-1,8	28,90	141,79	2,53	9,81	5,64	161,21	38,13	199,34
90	1,57	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	0,0	29,01	141,87	0,00	9,81	5,38	155,99	38,13	194,13
95	1,66	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	1,8	28,90	141,79	-2,53	9,81	5,13	149,87	38,13	188,00
100	1,75	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	3,5	28,57	141,56	-5,04	9,81	4,88	143,03	38,13	181,16
105	1,83	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	5,3	28,02	141,17	-7,51	9,81	4,65	135,66	38,13	173,79
110	1,92	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	7,0	27,26	140,64	-9,92	9,81	4,44	127,93	38,13	166,07
115	2,01	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	8,6	26,29	139,96	-12,26	9,81	4,24	119,97	38,13	158,11
120	2,09	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	10,2	25,12	139,14	-14,50	9,81	4,05	111,89	38,13	150,03
125	2,18	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	11,7	23,76	138,18	-16,64	9,81	3,88	103,78	38,13	141,91
130	2,27	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	13,1	22,22	137,10	-18,64	9,81	3,72	95,70	38,13	133,83
135	2,36	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	14,4	20,51	135,90	-20,51	9,81	3,57	87,68	38,13	125,82
140	2,44	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	15,6	18,64	134,59	-22,22	9,81	3,44	79,78	38,13	117,91
145	2,53	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	16,7	16,64	133,18	-23,76	9,81	3,32	71,99	38,13	110,12
150	2,62	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	17,6	14,50	131,68	-25,12	9,81	3,22	64,32	38,13	102,46
155	2,71	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	18,5	12,26	130,11	-26,29	9,81	3,13	56,78	38,13	94,91
160	2,79	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	19,1	9,92	128,47	-27,26	9,81	3,04	49,34	38,13	87,48
165	2,88	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	19,7	7,51	126,77	-28,02	9,81	2,98	42,01	38,13	80,14
170	2,97	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	20,1	5,04	125,04	-28,57	9,81	2,92	34,75	38,13	72,88
175	3,05	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	20,3	2,53	123,28	-28,90	9,81	2,87	27,54	38,13	65,68
180	3,14	121,5	57,2	19,07	13,6	1,42	29,01	20,4	0,00	121,50	-29,01	9,81	2,83	20,37	38,13	58,50

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO GRECO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	18
<b>GRE</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0009</b>	<b>00</b>		

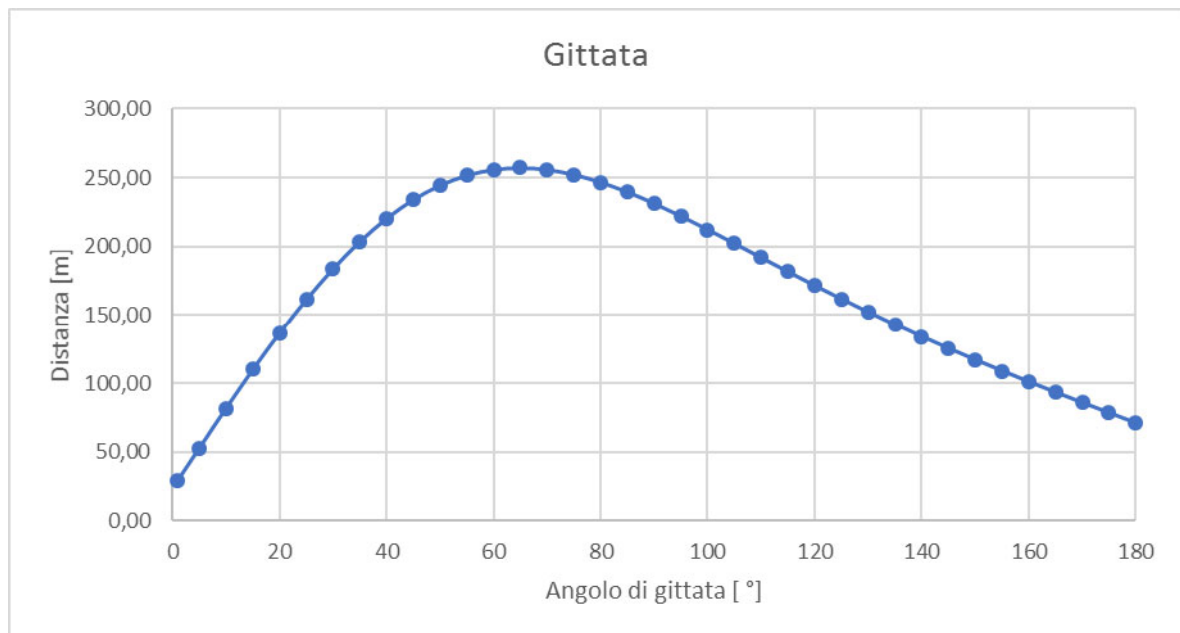


Figura 5 – Andamento della gittata al variare di  $\theta$  per l'aerogeneratore di Greci.

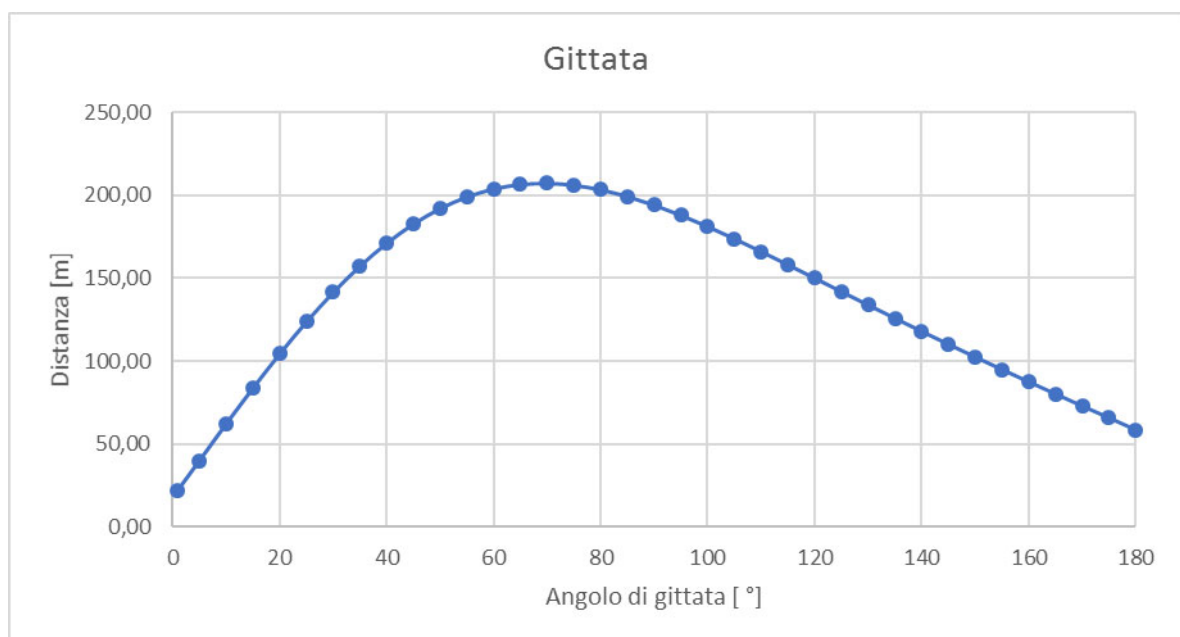


Figura 6 – Andamento della gittata al variare di  $\theta$  per l'aerogeneratore di Montaguto.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO GRECO EOLICO GRECI-MONTAGUTO RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	19
GRE	ENG	REL	0009	00		

## 6. CONCLUSIONI

Partendo dai dati degli aerogeneratori in merito alla velocità di rotazione (rpm) sono stati eseguiti dei calcoli di gittata con la teoria della fisica del punto materiale. Il calcolo illustrato nei paragrafi precedenti porta ad un valore massimo di gittata pari a 256,95 m per l'aerogeneratore afferente al sito di Greci e di 207,26 m per quella relativa al sito di Montaguto.

Pertanto, la gittata massima calcolata garantisce la distanza di sicurezza sia dalle strade provinciali che statali sia da edifici presenti nell'area del parco.

Si sottolinea come da dati messi a disposizione da fornitori di turbine eoliche, il calcolo rigoroso (paragrafo 5.2) porta a risultati meno cautelativi di quanto non lo siano quelli effettuati in questa sede.

GRECI			
AEROGENERATORE	DISTANZA STRADA STATALE O PROVINCIALE[m]	DISTANZA IMMOBILI [m]	GITTATA [m]
R-GR01	614	615	256,95
R-GR02	631	756	256,95
R-GR03	276	381	256,95
R-GR04	1.007	1.041	256,95
R-GR05	1.495	1.502	256,95
R-GR06	2.363	2.393	256,95

MONTAGUTO			
AEROGENERATORE	DISTANZA STRADA STATALE O PROVINCIALE[m]	DISTANZA IMMOBILI [m]	GITTATA [m]
R-MA02	441	279	207,26
R-MA03	726	531	207,26
R-MA04	799	761	207,26
R-MA05	914	954	207,26

Come visibile dalla tabella sopra riportata, le gittate ricavate sono inferiori rispetto a tutte le distanze turbine/strade provinciali e turbine/immobili estrapolate dal nuovo layout dell'impianto eolico di Greci-Montaguto