

COMUNE DI MONTALTO DI CASTRO
PROVINCIA DI VITERBO
PROGETTO: MONTALTO

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO DI PRODUZIONE DI ENERGIA
 ELETTRICA DA FONTE EOLICA DELLA POTENZA DI 43,2 MW E SISTEMA DI
 ACCUMULO DA 27,6 MW

RELAZIONE E CALCOLI SULLA GITTATA MASSIMA

IL COMMITTENTE



Sorgenia Renewables s.r.l. – Via Alessandro
 Algardi 4 Milano Lombardia 20148

GRUPPO DI PROGETTAZIONE



Switch Engineering s.r.l. – Via Francesco
 Benaglia 13, 00153 Roma – P.IVA 1550097005

IL TECNICO



REV.	DATA	DESCRIZIONE
0	30/10/2023	Prima emissione
1		
2		
3		

N.
R.18

REVISIONE
00



Regione Toscana



Sommario

1	INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO DELL'INTERVENTO	3
2	QUADRO DI RIFERIMENTO TECNICO DEL PROGETTO	4
3	INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA.....	5
3.1	Descrizione del Problema.....	5
3.2	Componentistica d'Impianto	5
3.3	Condizioni di Rischio	8
4	CASI DI STUDIO.....	10
4.1	Caso 1: Moto Irrotazionale.....	10
4.2	Caso 2: Moto Irrotazionale.....	10
4.3	Caso 1: Moto Irrotazionale.....	11
4.4	Forze agenti sulla pala.....	12
4.5	Geometria del problema	13
4.6	Risultati Numerici.....	14

1 INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO DELL'INTERVENTO

La presente relazione contiene l'analisi della gittata massima degli elementi rotanti per gli aerogeneratori previsti in un progetto per la realizzazione di un impianto eolico in Agro del Comune di Montalto di Castro in Provincia di Viterbo. Il presente progetto è costituito da 6 aerogeneratori tripala (WTG) ad asse orizzontale, ciascuno di potenza nominale pari a 7,2 MW, per una potenza elettrica complessiva pari a 43,2 MW.

Il seguente inquadramento localizza nello specifico l'intervento progettato all'interno dell'area ubicata del Comuni di Montalto di Castro:



Figura 1: Inquadramento Ortofoto di dettaglio dell'area d'impianto

In particolare l'area oggetto di intervento è ubicata a nord del centro abitato di Montalto di Castro, nella porzione di territorio compresa in prossimità della Strada Provinciale 105 (a Est dell'impianto). Inoltre, l'impianto si colloca a sud del confine tra la Regione Lazio e la Regione Toscana. Di seguito è riportato un inquadramento su ortofoto più esteso dell'intervento in cui sono mostrate le posizioni degli aerogeneratori rispetto al comune di Montalto di Castro, alla viabilità di nuova realizzazione ed alla posizione della Stazione Elettrica (SE) Terna presso la quale si ha l'allaccio dell'impianto con la rete elettrica nazionale RTN.

2 QUADRO DI RIFERIMENTO TECNICO DEL PROGETTO

L'impianto di progetto, costituito da:

- n. 6 aerogeneratori di potenza nominale massima **7.20 MW** ciascuno e dimensioni massime **125.00 m** per quanto l'altezza del mozzo e **172.00 m** per quanto il diametro del rotore;
- Un cavidotto MT, di collegamento tra gli aerogeneratori;
- Un cavidotto MT, di collegamento tra gli aerogeneratori e la Sottostazione Elettrica di Utenza.
- Un collegamento MT tra la Sottostazione Elettrica di Utenza 30/36 kV e il sistema di BESS di energy storage; gli energy storage systems saranno 10, per una potenza complessiva pari a 27,6 MW.
- Un collegamento AT 150 kV tra la Sottostazione Elettrica di Utenza e la Stazione Elettrica (SE) 'Manciano'.
- Un punto di connessione a 36 kV all'interno di una Nuova Stazione Elettrica (SE). In base alla Soluzione Tecnica Minima Generale (Codice Pratica STMG: 202202981), l'intervento di cui in oggetto verrà collegato in antenna a 36 kV sulla sezione 36 kV di una nuova Stazione Elettrica (SE) della RTN a 380/150/36 kV da inserire in entra – esce alla linea RTN a 380 kV.

Le caratteristiche dimensionali della turbina di progetto sono riportate in Tabella 1:

Potenza [MW]	Altezza Mozzo [m]	Diametro Rotore [m]	Lunghezza Pala [m]	Max Velocità di Rotazione [RPM]
7.2	125	172	86	12.1

Tabella 1: Caratteristiche dimensionali aeromotore di progetto

3 NQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

3.1 Descrizione del Problema

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala o un frammento della stessa) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse. Tuttavia, al fine della sicurezza, la stima della **gittata massima** di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico. Le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro rinforzato con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche.

L'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi ad annullare la probabilità di distacco di parti della pala mentre la stessa è in rotazione. Anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono, di fatto, unita in un unico pezzo (seppure gravemente danneggiato), ed i sistemi di controllo dell'aerogeneratore riducono pressoché istantaneamente la velocità di rotazione, eliminando la possibilità che un frammento di pala si stacchi e venga proiettato verso l'alto.

Tutte le pale oggi in commercio sono inoltre protette dalla fulminazione diretta in accordo alla norma **IEC 61400 – 24 – livello I**.

Considerate le caratteristiche meccaniche e costruttive della pala, si può pertanto concludere che ha senso effettuare esclusivamente un calcolo di **gittata della pala intera** in quanto esiste un punto di discontinuità, l'attacco bullonato che unisce la pala al mozzo, ed esiste un'ipotesi, seppur remota, sulla possibilità di cedimento di tale attacco. L'obiettivo di questo lavoro è determinare la distanza che una pala di un aerogeneratore raggiunge nel caso di distacco dal mozzo mentre la macchina è in funzione.

3.2 Componentistica d'Impianto

L'impianto oggetto del presente progetto è composto da 6 aerogeneratori, ciascuno dei quali avente le medesime caratteristiche di tutti gli altri.

Per quanto riguarda le componenti di ciascuno di essi, si fa presente che ogni generatore eolico ad asse di rotazione orizzontale al suolo (HAWT, in inglese Horizontal Axis Wind

Turbines) è formato da una torre in acciaio sulla cui sommità si trova un involucro, gondola o navicella, che contiene un generatore elettrico azionato da un rotore a pale. La potenza molto variabile generata dal rotore è funzione della ventosità del luogo e del tempo.

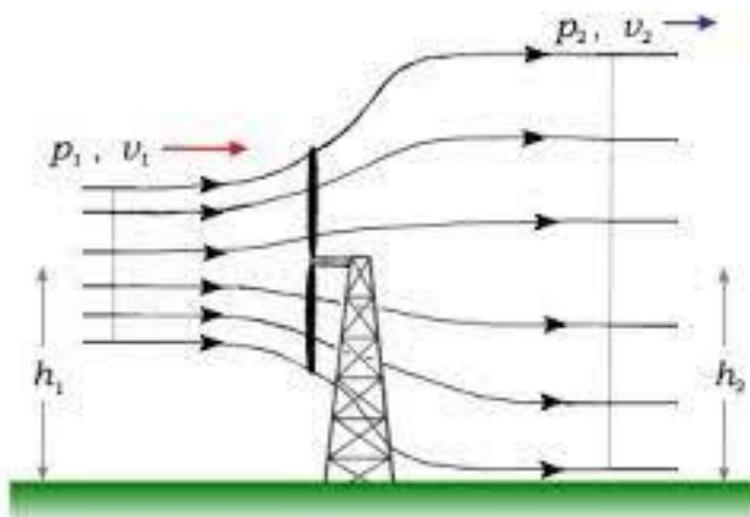


Figura 1: Interazione Vento - Turbina Eolica

Così come i generatori ad asse verticale, anche quelli ad asse orizzontale richiedono una velocità minima di 3–5 m/s ed erogano la potenza di progetto ad una velocità del vento di 12–14 m/s. Ad elevate velocità (20–25 m/s) l'aerogeneratore viene invece bloccato dal sistema frenante per ragioni di sicurezza.

Gli aerogeneratori tradizionali hanno, quasi senza eccezioni, l'asse di rotazione orizzontale. Questa caratteristica è il limite principale alla realizzazione di macchine molto più grandi di quelle attualmente prodotte. La velocità del vento cresce con la distanza dal suolo; questa è la principale ragione per la quale i costruttori di aerogeneratori tradizionali spingono le torri a quote così elevate. Una turbina eolica tipicamente comprende una struttura di sostegno tubolare in metallo, generatori a velocità variabile, vele in materiale composito, e controllo parziale del beccheggio, aerodinamica, struttura e acustica.

Per quanto riguarda le pale della turbina, esse sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente compiti di forma.

Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico. Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati

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

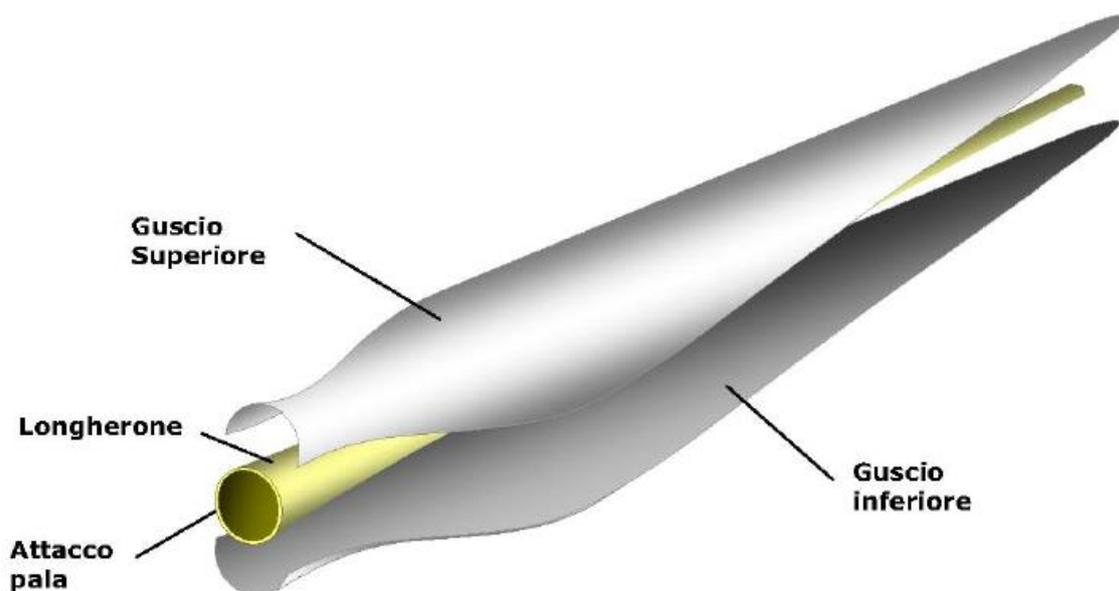


Figura 2: Schema strutturale di una pala eolica

È necessario enfatizzare che dal punto di vista progettuale la combinazione di coefficienti di sicurezza per i carichi, i materiali utilizzati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura rispettano quanto prescritto dalla norma IEC61400-1. In accordo a tale norma le pale degli aerogeneratori sono considerate "fail safe".

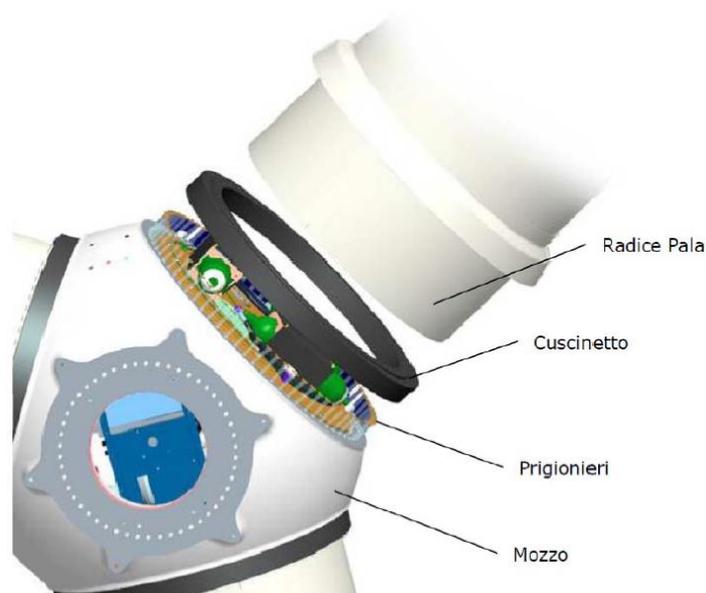


Figura 3: Dettagli di una pala al mozzo

3.3 Condizioni di Rischio

Questo paragrafo è stato redatto al fine di presentare alcuni degli elementi fondamentali per valutare la remota possibilità di distacco di una pala dagli aerogeneratori. Tralasciando gli incidenti dovuti a cause eccezionali ed estremi (uragani, tifoni), verrà di seguito fornita una valutazione tecnica basata sull'analisi dei rischi sviluppata per garantire resistenza di fronte alle condizioni di rischio qui descritte.

Il distacco completo di una pala dal rotore dell'aerogeneratore può verificarsi a seguito della rottura della giunzione bullonata fra la pala e il mozzo. Generalmente eventi di questo tipo risultano altamente improbabili, mentre più concreto, seppur ugualmente remoto, risulta essere il rischio di rottura della pala. Le pale di questo tipo di aerogeneratore sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine costituito da:

- Recettori metallici posti all'estremità di pala e lungo l'apertura della pala;
- Un cavo che collega i recettori alla radice pala;
- Un sistema di messa a terra.

In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale.

In qualche caso in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali), si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala, la quale si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non determina un distacco dal corpo della pala stessa.

Eventuali residui o frammenti di guscio dovuti ad un evento ceraunico hanno dimensioni e pesi così esigui da non permettere valutazioni circa eventuali traiettorie e gittate. Queste sono comunque determinate quasi esclusivamente dal trasporto degli stessi ad opera del vento.

4 CASI DI STUDIO

Tutte le condizioni di rottura sono state assunte avvenire quando il rotore è in posizione upwind e con una velocità del vento pari a 53 m/s. Questa condizione è anch'essa conservativa in quanto dà la massima gittata fuori dal piano. Data la pala rappresentata in Figura 4:

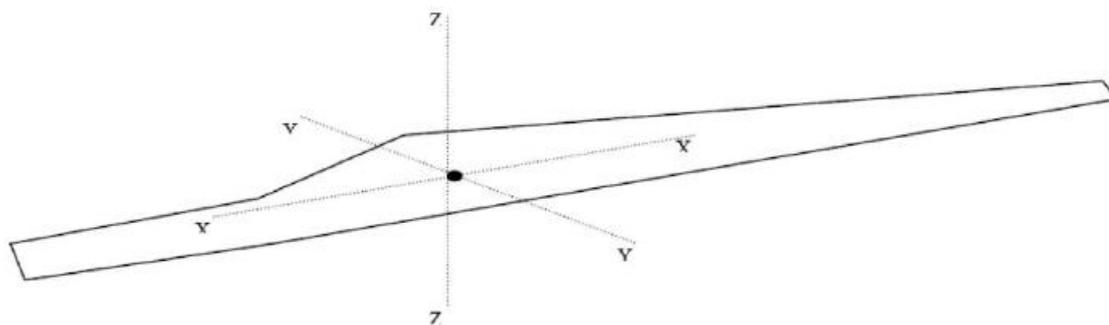


Figura 4: Sistema di Coordinate Utilizzato per la pala

Sono state calcolate tre traiettorie nelle seguenti ipotesi:

4.1 Caso 1: Moto Irrotazionale

Assenza di moti intorno agli assi XX, YY e ZZ. L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano verticale. Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata.

Quindi:

- Nessuna forza di portanza agisce nella direzione in-plane;
- La massima resistenza è generata nella direzione out-of-plane;
- La resistenza nel piano agisce sulla sezione nel piano XZ.

4.2 Caso 2: Moto Irrotazionale

L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano orizzontale. Quando la pala ha raggiunto questa posizione non ci sono ulteriori moti intorno agli assi XX, YY e ZZ.. In questo caso la traiettoria risultante è del tipo "a giavellotto". Questa ulteriore assunzione

fa sì che questo caso sia il caso teorico peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi:

- La traiettoria in alto è aumentata dalla forza di portanza generata dalla pala, per cui la gittata è maggiore che in assenza di portanza.

Tre casi sono stati modellati:

- Caso 2a. L'effetto della portanza sul tempo di volo è zero. La soluzione (approssimata) per questo è data dal caso 1 solo nella direzione in-plane.
- Caso 2b. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%.
- Caso 2c. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%, in questo caso si ottiene il maggior tempo di volo.

4.3 Caso 1: Moto Irrotazionale

In questo caso si studia il moto della pala al distacco del rotore nel suo complesso considerando anche i moti di rotazione intorno agli assi XX, YY e ZZ. Questo caso è il caso più reale della traiettoria di una pala. La rotazione della pala intorno all'asse ZZ è causato dalla conservazione del momento della quantità di moto.

L'incidenza del vento out-of-plane sulla pala genera un momento intorno all'asse YY (centro di massa e centro aerodinamico della pala non sono coincidenti). Il vento incidente out-of-plane sulla pala genera ancora un momento intorno all'asse XX (centro di massa della sezione di pala lungo la corda non coincide con il centro aerodinamico). La resistenza della pala sia in-plane che out-of-plane è generata dalla rotazione intorno agli assi XX e YY. Per semplificare lo studio si è assunta l'area della pala pari alla stessa in direzione XY moltiplicata per il quadrato del coseno di 45°. La portanza in-plane è generata dalla rotazione intorno al piano XX. In questo caso si è assunto un aumento del 10% del tempo di volo dovuto alla portanza.

Tre casi sono stati modellati per tener conto dell'effettivo valore della resistenza:

- Caso 3a. C_d (in-plane e out-of-plane) = 0,5
- Caso 3b. C_d (in-plane e out-of-plane) = 1,0
- Caso 3c. C_d (in-plane e out-of-plane) = 1,5

La risoluzione del **terzo 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 primo caso, di facile soluzione e che fornisce un risultato maggiorato di circa il **20%**, **garantendo così un ulteriore margine di sicurezza.**

4.4 Forze agenti sulla pala

Le ipotesi fatte in questo studio considerano il caso peggiore: esso avviene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di 45° sul piano verticale (cioè 135° azimut). La determinazione delle forze e dei momenti agenti sulla pala a causa di una rottura istantanea durante il moto rotazionale è molto complessa.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente **dall'angolo di lancio** e **dalle forze generalizzate inerziali agenti sulla pala**. Queste includono anche, per esempio, oltre all'impulso anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise agenti al momento del distacco. La pala, quindi, quando inizierà il suo moto continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto). L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità. La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano. La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco. Le forze inerziali sono modellate considerando un flusso irrotazionale e stazionario.

Tuttavia, si fa presente che il presente studio è stato elaborato mettendo a punto un approccio prettamente cinematico. Infatti, **le forze di resistenza che agiscono sulla pala rendono minore il tempo di volo e quindi la gittata.** Ne consegue che, pur essendo molto più complesso, il moto reale dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala) e fornisce delle previsioni in difetto rispetto al caso in cui le forze viscosse vengono omesse.

Da un punto di vista teorico, se non si considerano le forze aerodinamiche la massima gittata si ottiene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di 60° . La formula mostra che, noti i valori di H (altezza del mozzo), R (il centro di massa della pala, pari a $1/3$ dell'intera

lunghezza dell'ala) e V (velocità di distacco dell'ala) la gittata L del centro geometrico dell'ala si avrà per θ pari a 60° .

4.5 Geometria del problema

Assumendo di trascurare le forze viscosse agenti sulla pala, la traiettoria del moto irrotazionale parabolico del baricentro di un'ala che si distacca dal mozzo di un aerogeneratore, è governata dal moto rettilineo uniforme e uniformemente accelerato:

$$x(t) = x_0 + v_0 t \quad (1)$$

$$y(t) = y_0 + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (2)$$

Dove:

x_0 = posizione della pala rispetto all'asse orizzontale (terreno)

y_0 = altezza iniziale del baricentro della pala

$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$ accelerazione di gravità

Tenendo conto che la geometria del problema può essere schematizzata come di seguito:

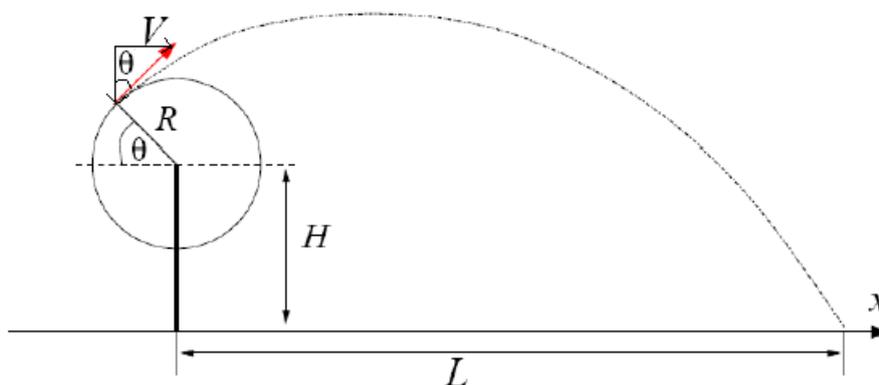


Figura 5: Geometria della gittata della pala

da cui si ricava che:

$$x_0 = -R \cos\theta \quad (3)$$

$$y_0 = H + R \sin\theta \quad (4)$$

$$v_x = v \sin\theta \quad (5)$$

$$v_y = v \cos\theta \quad (6)$$

Con la velocità valutata come segue:

$$v = \frac{2 \times \pi \times R \times RPM}{60} \quad (6)$$

Con RPM pari al numero di giri al minuto del rotore dell'aerogeneratore.

Da cui si ricava che:

$$L = \frac{v \sin\theta}{g} \left[v \cos\theta + \sqrt{v^2 \cos^2\theta + 2g(H + R \sin\theta)} \right] - R \cos\theta \quad (7)$$

Dove L rappresenta la gittata.

Si fa presente che il valore di gittata qui descritto tiene conto della distanza del centro geometrico della pala, per tanto per avere un valore complessivo relativo alla porzione di spazio effettivamente occupata dalla pala quanto questa raggiunge terra è necessario sommare:

$$L_{eff} = L + \frac{2R}{3} \quad (3)$$

$\frac{R}{3}$ è pari alla posizione del centro di massa della pala, pertanto alla gittata del centro di massa sarà necessario aggiungere i restanti $\frac{2}{3}$ per identificare il range di caduta dell'estremità dell'elica.

4.6 Risultati Numerici

L'analisi numerica è stata condotta tenendo conto delle diverse angolazioni che la pala può assumere rispetto alla linea di terra.

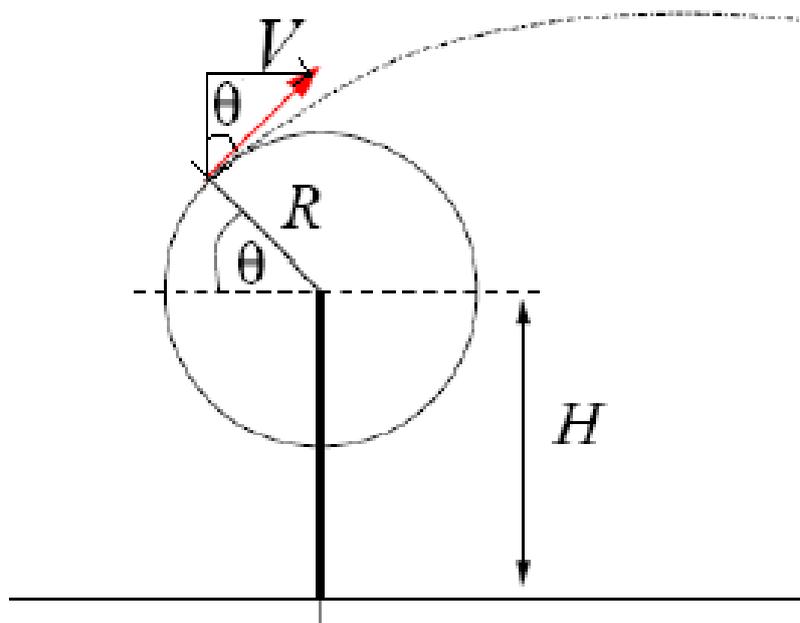


Figura 6: Variazione della posizione della pala in funzione di θ

Parametrizzando la traiettoria rotazionale della pala eolica, si è assunto che le uniche angolazioni che portano a gittate significative risultano essere quelle comprese tra 0° e 90° . Pertanto, applicando i dati elencati in precedentemente, dai calcoli si è ricavato che:

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
angle	0	30	45	60	90
L	-14,3333	158,7939265	212,229	234,426	203,3113
G	43	216,1272599	269,5623	291,7594	260,6446

Figura 7: Gittata Teorica L e Gittata Effettiva G in funzione dell'angolo θ

Ne consegue dunque che, se non si considerano le forze aerodinamiche, la massima gittata che si ottiene quando la pala si distacca dal rotore si determina quando la pala stessa raggiunge un angolo di 60° ed è pari a 235 metri la gittata teorica, mentre la gittata effettiva è pari a 292 metri circa.