

Impianto eolico di Collinas

Progetto definitivo

Oggetto:

COL - 18 - Relazione gittata massima elementi rotanti per rottura accidentale

Proponente:



Sorgenia Renewables S.r.l.
Via Algardi 4
Milano (MI)

Progettista:



Stantec S.p.A.
Centro Direzionale Milano 2, Palazzo Canova
Segrate (Milano)

Rev. N.	Data	Descrizione modifiche	Redatto da	Rivisto da	Approvato da
00	14-04-2023	Prima Emissione	F. MALTA	A. BELLISAI M. IAQUINTA	P. POLINELLI

Fase progetto: **Definitivo** Formato elaborato: **A4**

Nome File: **COL-18.01 - Rel. gittata massima elementi rotanti per rottura accidentale**

Indice

1	PREMESSA	3
1.1	Descrizione del proponente	4
1.2	Contenuti della relazione.....	4
2	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	6
3	GLI AEROGENERATORI E IL LORO FUNZIONAMENTO	8
4	ANALISI STORICA DEGLI INCIDENTI	11
5	ROTTURA PALA E CALCOLO GITTATA MASSIMA	12
5.1	Introduzione e ipotesi alla base del modello di calcolo	12
5.2	Aerogeneratore di riferimento	13
5.3	Calcolo della gittata massima	15
5.4	Risultati.....	17
6	CONCLUSIONI	20

Indice delle figure

Figura 2-1: Inquadramento territoriale dell'impianto di Collinas	6
Figura 2-2: Inquadramento su ortofoto dell'area dell'impianto eolico di Collinas.....	7
Figura 3-1: Elementi tipici di un aerogeneratore.....	9
Figura 3-2: Caratteristiche dettagliate dei componenti presenti in una turbina eolica	9
Figura 5-1: Vista e caratteristiche di un aerogeneratore da 6,0 MW	14
Figura 5-2: Traiettoria della pala distaccata	16
Figura 5-3: Gittata al tip vs. angolo di distacco	19

1 PREMESSA

La società Sorgenia Renewables S.r.l, d'ora in avanti il proponente, intende realizzare un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nella provincia del Sud Sardegna, in agro del comune di Collinas.

L'impianto sarà costituito da 8 aerogeneratori di potenza unitaria nominale fino a 6 MW, per una potenza installata complessiva fino a 48 MW.

Data la potenza dell'impianto, superiore ai 10.000 kW, il servizio di connessione sarà erogato in alta tensione (AT), ai sensi della Deliberazione dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas 23 luglio 2008 n.99 e s.m.i.

Gli aerogeneratori forniscono energia elettrica in bassa tensione (690V) e sono pertanto dotati di un trasformatore MT/BT ciascuno, alloggiato all'interno dell'aerogeneratore stesso e in grado di elevare la tensione a quella della rete del parco. La rete del parco è costituita da un cavidotto interrato in media tensione (30kV), tramite il quale l'energia elettrica viene convogliata dagli aerogeneratori alla sottostazione elettrica (SSE) di trasformazione AT/MT di proprietà del proponente che sarà collegata in antenna ad una nuova stazione elettrica (SE) di smistamento a 380/150/36 kV della RTN, da inserirsi in modalità entra-esce sulla linea a 380 kV "Ittiri-Selargius" (nel seguito "nuova SE").

Le opere progettuali sono quindi sintetizzate nel seguente elenco:

- parco eolico composto da 8 aerogeneratori, da 6 MW ciascuno, con torre di altezza fino a 125 m e diametro del rotore fino a 170 m, e dalle relative opere civili connesse quali strade di accesso, piazzole e fondazioni;
- impianto di rete, consistente in una nuova SE di smistamento a 380/150/36 kV della RTN da inserirsi in modalità entra-esce sulla futura linea a 380 kV "Ittiri-Selargius";
- impianto di utenza per la connessione alla RTN, consistente nella rete di terra, nella rete di comunicazione in fibra ottica, nel cavidotto in media tensione (30kV) interamente interrato e sviluppato principalmente sotto strade esistenti, nella SSE di trasformazione 150/30 kV di proprietà del Proponente e nell'elettrodotto a 150 kV di collegamento tra la SSE e la nuova SE.

I progetti del tipo in esame rispondono a finalità di interesse pubblico (riduzione dei gas ad effetto serra, risparmio di fonti fossili scarse ed importate) ed in quanto tali sono indifferibili ed urgenti, come stabilito dalla legge 1° giugno 2002, n. 120, concernente "Ratifica ed esecuzione del Protocollo di Kyoto alla Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, fatto a Kyoto l'11 dicembre 1997" e dal D.Lgs. 29 dicembre 2003, n.387 "Attuazione della direttiva

2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità" e s.m.i.

L'utilizzo di fonti rinnovabili comporta infatti beneficio a livello ambientale, in termini di tonnellate equivalenti di petrolio (TEP) risparmiate e mancate emissioni di gas serra, polveri e inquinanti. Per il progetto in esame si stima una producibilità del parco eolico superiore a 130 GWh/anno (Produzione Media Annuale P50), che consente di risparmiare almeno 24.000 TEP/anno (fonte ARERA: 0,187 TEP/MWh) e di evitare almeno 64.000 ton/anno di emissioni di CO₂ (fonte ISPRA, 2020: 493,80 gCO₂/kWh).

1.1 Descrizione del proponente

Il soggetto proponente del progetto in esame è Sorgenia Renewables S.r.l., interamente parte del gruppo Sorgenia Spa, uno dei maggiori operatori energetici italiani. Il Gruppo è attivo nella produzione di energia elettrica con oltre 4'750 MW di capacità di generazione installata e oltre 400'000 clienti in fornitura in tutta Italia. Efficienza energetica e attenzione all'ambiente sono le linee guida della sua crescita. Il parco di generazione, distribuito su tutto il territorio nazionale, è costituito dai più avanzati impianti a ciclo combinato e da impianti a fonte rinnovabile, per una capacità di circa 370 MW tra biomassa ed eolico. Nell'ambito delle energie rinnovabili, il Gruppo, nel corso della sua storia, ha anche sviluppato, realizzato e gestito impianti di tipo fotovoltaico (ca. 24 MW), ed idroelettrico (ca. 33 MW). In quest'ultimo settore, Sorgenia è attiva con oltre 75 MW di potenza installata gestita tramite la società Tirreno Power, detenuta al 50%. Il Gruppo Sorgenia, tramite le sue controllate, fra le quali Sorgenia Renewables S.r.l., è attualmente impegnata nello sviluppo di un importante portafoglio di progetti rinnovabili di tipo eolico, fotovoltaico, biometano, geotermico ed idroelettrico, caratterizzati dall'impiego delle Best Available Technologies nel pieno rispetto dell'ambiente

1.2 Contenuti della relazione

La presente relazione riporta la valutazione della gittata massima che si ottiene attraverso il moto percorso da una pala distaccatasi dall'aerogeneratore.

Il capitolo 2 descrive in generale il sito e il layout degli aerogeneratori di nuova costruzione.

Il capitolo 3 descrive in generale le caratteristiche tecniche e costruttive di un aerogeneratore moderno di grossa taglia ed espone brevemente il suo funzionamento.

Nel capitolo 4 è riportata una breve analisi storica e statistica degli incidenti sugli aerogeneratori, focalizzato sulle pale.

Il capitolo 5 affronta il metodo di calcolo della gittata massima, mentre nel capitolo 6 sono riportate le conclusioni con riferimento alle posizioni degli aerogeneratori di nuova costruzione in sito.

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il sito in cui sarà ubicato il parco eolico di nuova costruzione è collocato nel comune di Collinas, nella provincia del Sud Sardegna, in Sardegna.

L'impianto eolico di Collinas è localizzato a circa 45 km dal capoluogo, a circa 1,2 km dal centro urbano del comune di Collinas, ed a circa 8 km in direzione nord-ovest dal centro abitato del comune di Sanluri.

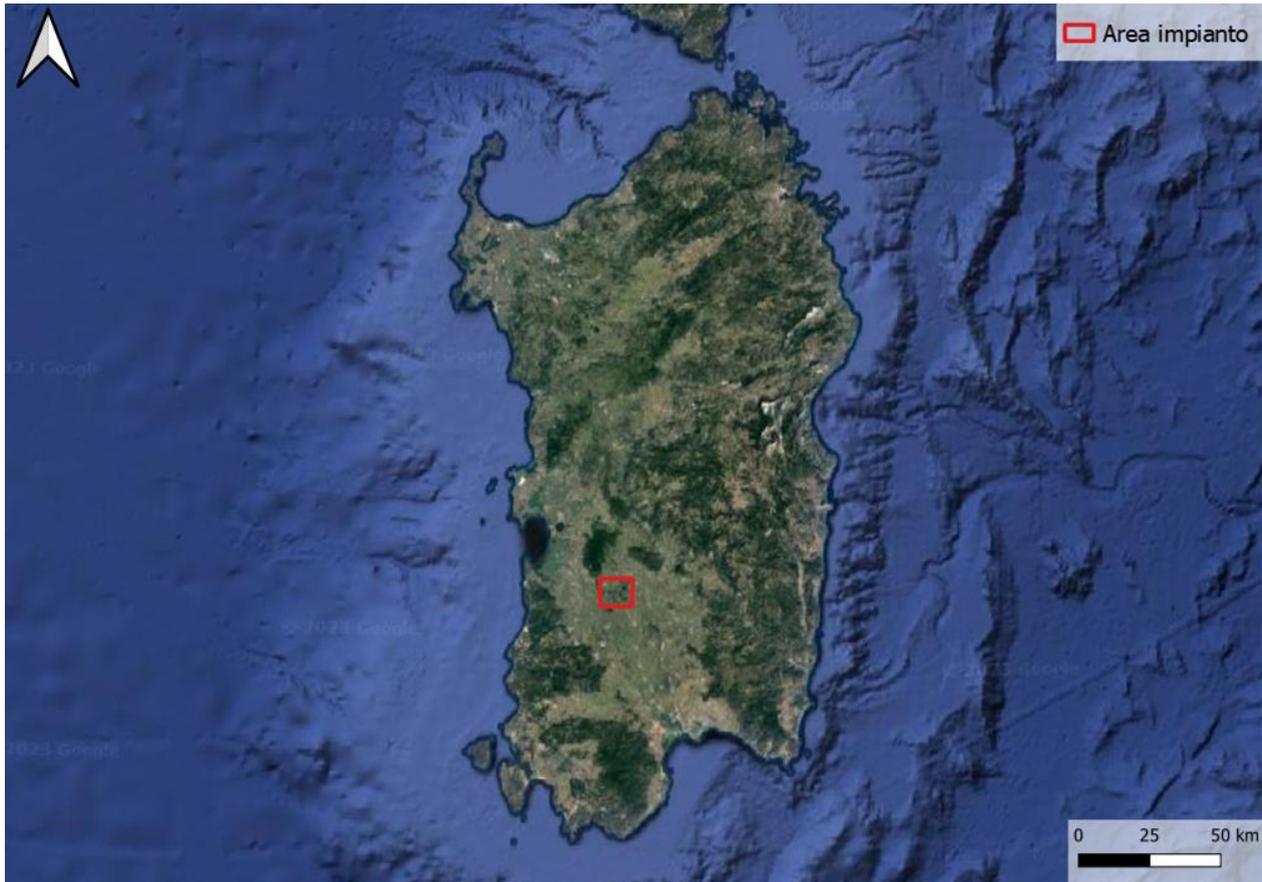


Figura 2-1: Inquadramento territoriale dell'impianto di Collinas

L'impianto eolico di Collinas è situato in una zona prevalentemente collinare non boschiva caratterizzata da un'altitudine media pari a circa 300 m s.l.m., con sporadiche formazioni di arbusti e la presenza di terreni seminativi/incolti.

Il parco eolico ricade all'interno dei seguenti fogli catastali:

- Fogli 1,4, 7, 9, 10, 22 nel comune di Collinas

In Figura 2-2 è riportato l'inquadramento territoriale dell'area nel suo stato di fatto e nel suo stato di progetto, con la posizione degli aerogeneratori su ortofoto.



Figura 2-2: Inquadramento su ortofoto dell'area dell'impianto eolico di Collinas

Si riporta in formato tabellare un dettaglio sulla localizzazione delle turbine eoliche di nuova costruzione, in coordinate WGS84 UTM fuso 32 N:

Tabella 1: Localizzazione geografica degli aerogeneratori di nuova costruzione

ID	Comune	Est [m]	Nord [m]
CO01	Collinas	481841	4388538
CO02	Collinas	482705	4388489
CO03	Collinas	482834	4389529
CO04	Collinas	484824	4390072
CO05	Collinas	485765	4389899
CO06	Collinas	486631	4389443
CO07	Collinas	487941	4388648
CO08	Collinas	487087	4386511

3 GLI AEROGENERATORI E IL LORO FUNZIONAMENTO

Un aerogeneratore (o turbina eolica) è, in generale, costituito dai seguenti sottosistemi principali:

- il rotore, che trasforma l'energia cinetica del vento in energia meccanica mediante tre pale, opportunamente sagomate secondo un profilo aerodinamico e montate su un asse orizzontale o verticale rispetto al terreno;
- l'apparato di conversione dell'energia meccanica in energia elettrica, basato su un generatore elettrico rotante azionato dal rotore eolico attraverso un sistema di trasmissione, che spesso comprende un moltiplicatore di giri per ottenere la velocità appropriata per il generatore;
- il convertitore statico di frequenza e tensione, se necessario per ottenere una potenza elettrica con caratteristiche diverse da quelle in uscita dal generatore all'immissione alla rete elettrica.

Nelle macchine ad asse orizzontale, come quelle dell'impianto eolico oggetto della presente relazione, il rotore ha di norma tre pale, generalmente costruite in vetroresina con eventuali rinforzi in fibra di carbonio. Le pale sono a passo variabile, cioè il loro angolo di calettamento al mozzo può essere variato da un servomeccanismo comandato dal sistema di controllo dell'aerogeneratore. Gli aerogeneratori ad asse orizzontale comprendono, oltre al rotore, i seguenti componenti strutturali principali:

- la navicella o gondola, in cui sono alloggiati gli alberi di trasmissione, il moltiplicatore di giri, il generatore, eventuali altri componenti elettrici e le apparecchiature ausiliarie e di controllo; la navicella viene orientata dal sistema di controllo per mantenere l'asse del rotore allineato alla direzione del vento;
- il sostegno, generalmente metallico con struttura tubolare o a traliccio, che ha la funzione di mantenere il rotore ad un'altezza opportuna rispetto al suolo (la velocità del vento tende ad aumentare con l'altezza) e appoggia, a sua volta, su una fondazione in calcestruzzo armato.

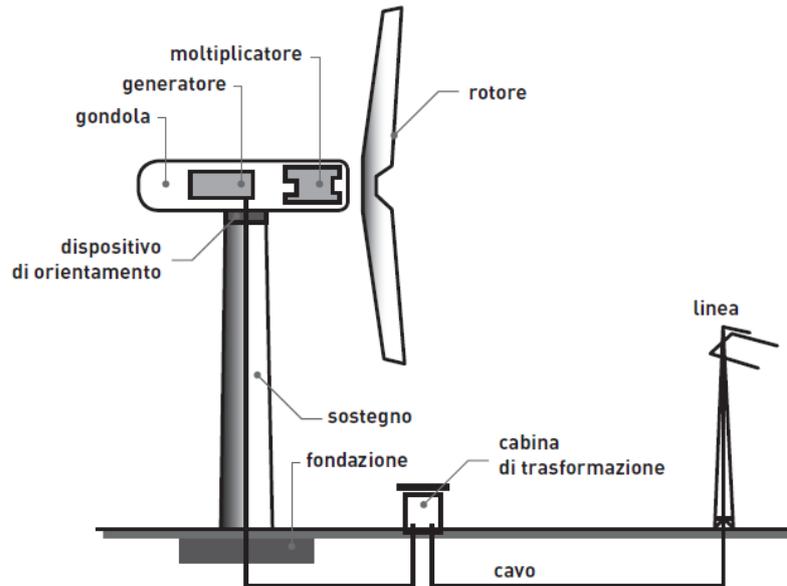


Figura 3-1: Elementi tipici di un aerogeneratore

La figura successiva mostra un dettaglio del rotore e della navicella:



Figura 3-2: Caratteristiche dettagliate dei componenti presenti in una turbina eolica

Il meccanismo di funzionamento della macchina è il seguente: la vena fluida impatta contro le pale della turbina, azionando il moto rotatorio del rotore. Quest'ultimo, che è calettato al generatore elettrico attraverso l'albero lento, il moltiplicatore di giri e l'albero veloce, trasferisce l'energia cinetica al generatore, il quale a sua volta la converte in energia elettrica.

Il trasformatore presente in navicella innalza la tensione dell'energia prodotta e attraverso un sistema di cavidotti l'energia prodotta viene immessa nella rete elettrica nazionale.

4 ANALISI STORICA DEGLI INCIDENTI

Diversi studi¹ condotti a livello internazionale tra il 1990 e il 2014 hanno evidenziato che la probabilità di guasto di una pala in un anno è compresa tra lo 0,1% e lo 0,7%. La variabilità dei dati è dovuta al differente numero di campioni, a differenti tassi di guasto e differenti ore di manutenzione dovute alla rottura.

Inoltre, uno studio² americano del 2013, effettuato su un campione di circa 10.000 aerogeneratori, caratterizzati dall'essere operativi da anni diversi, ha evidenziato che circa il 2% delle turbine (nei primi 10 anni di funzionamento) richiedono la sostituzione della pala, considerando però anche tutte le sostituzioni che avvengono nei primi due anni di funzionamento dovute a problemi durante il trasporto e la costruzione.

Lo studio evidenzia inoltre che la causa maggiore di rottura delle pale è dovuta all'impatto con i fulmini; tuttavia, il distacco della stessa si verifica in minima parte.

¹ Branner K., Ghadirian A., "Database about blade faults", 2014

² Lantz E. (NREL), "Operations Expenditures: Historical Trends And Continuing Challenges", 2013

5 ROTTURA PALA E CALCOLO GITTATA MASSIMA

In questa sezione vengono riportate un'introduzione alla problematica della rottura di pala, le specifiche dell'aerogeneratore di riferimento e infine il calcolo della gittata massima.

5.1 Introduzione e ipotesi alla base del modello di calcolo

La rottura improvvisa di una pala dell'aerogeneratore (o di un frammento di essa) è un fattore molto importante da analizzare in fase di progettazione e per la localizzazione dell'impianto eolico.

La rottura di una pala, che spesso avviene alla radice di essa, è un evento che ha due cause principali:

1. Rottura del giunto di collegamento tra mozzo e pala;
2. Fenomeni di fatica sul profilo di pala causati dalla discontinuità della struttura.

Lo studio in oggetto ha lo scopo di analizzare, nell'eventualità che si verifichi il distacco di una pala, il moto di caduta da essa percorsa.

A differenza di un classico moto parabolico (es. moto del proiettile), in cui è possibile definire che l'angolo a cui vi è la gittata massima è 45° , la complessa struttura geometrica ed aerodinamica della pala porta a dover studiare in modo più approfondito il fenomeno del distacco di pala.

Di seguito, vengono riportate alcune definizioni ed ipotesi utili per la definizione e il calcolo della gittata massima, affrontato nei paragrafi successivi:

- **Gittata (L):** è la distanza percorsa lungo l'asse delle ascisse da un corpo lasciato in aria. Essa dipende fortemente dall'angolo di distacco, dalle caratteristiche della pala come dimensione, peso e profilo aerodinamico, dalla velocità di rotazione del corpo, dalla velocità del vento e dalle forze di attrito che agiscono sulla pala durante il volo.
- **Tempo di volo (T):** è l'intervallo di tempo che intercorre tra il distacco del corpo ed il suo arrivo al suolo (il tempo trascorso in aria). Come definito per la gittata, esso dipende dalle caratteristiche della pala, dall'angolo di distacco e dalla velocità di rotazione del corpo.

Il calcolo della gittata massima dell'aerogeneratore necessita, inoltre, di alcune ipotesi semplificative, necessarie a descrivere il modello del moto parabolico:

- Viene considerato il distacco della totalità della pala in modo istantaneo. Questa ipotesi è assolutamente conservativa, dato che non si considera la resistenza posta dalla pala;
- Viene considerata la rotazione massima (massimi giri al minuto) per la turbina al momento del distaccamento. Questa ipotesi è decisamente conservativa poiché viene preso come

riferimento il regime rotazionale massimo ammissibile, sicuramente superiore a quello tipicamente corrispondente a velocità di vento compatibili con quelle di cut-out.

- Sono considerati solamente gli effetti gravitazionali sul moto e non gli effetti di attrito di aria e vento. Questa ipotesi è conservativa, dato che trascurare gli effetti di aria e vento causa un incremento del valore della gittata massima della pala distaccata a favore di sicurezza. Gli effetti di portanza sul profilo della pala sono trascurati;
- Il moto della pala al momento del distacco è un moto complesso, che dipende strettamente dalle dimensioni della pala, dal suo peso e dalle forze aerodinamiche in gioco. Il modello teorico che meglio descrive il moto della pala è il "moto rotazionale complesso" che permette di descrivere il moto della pala tridimensionalmente. In questa analisi, trascurando gli effetti di aria e vento, il moto della pala distaccata viene descritto attraverso il movimento del punto del centro di massa (baricentro), posto ad 1/3 della lunghezza di pala. Tali considerazioni sono utili al fine di descrivere un moto dipendente solamente dagli effetti gravitazionali. Tale ipotesi, che non considera effetti di attrito e il moto rotazionale complesso, porta a sovrastimare il valore della gittata a favore di sicurezza;
- La caduta della pala viene considerata sempre orizzontale per tutta la sua lunghezza;
- Non si considera alcuna mutazione della velocità del vento durante il volo. La velocità del vento durante il volo è bensì assunta pari a quella al momento del distacco e pari alla velocità massima di funzionamento.

5.2 Aerogeneratore di riferimento

Gli aerogeneratori che verranno installati presso il nuovo impianto oggetto di questo studio saranno selezionati sulla base delle più innovative tecnologie disponibili sul mercato. La potenza nominale delle turbine previste sarà pari a massimo 6,0 MW. Il tipo e la taglia esatta dell'aerogeneratore saranno comunque individuati in seguito della fase di acquisto della macchina e verranno descritti in dettaglio in fase di progettazione esecutiva. Tuttavia, le dimensioni massime dell'aerogeneratore saranno 170 m di diametro del rotore e 125 m di altezza del mozzo.

Si riportano di seguito le caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore (in grassetto i valori necessari per il calcolo della gittata):

Tabella 2: Caratteristiche tecniche aerogeneratore

Potenza nominale	6,0 MW
Diametro del rotore D	Fino a 170 m
Lunghezza della pala r_{tip}	83,5 m
Corda massima della pala	4,5 m
Area spazzata	22.698 m ²
Altezza al mozzo H_m	Fino a 125 m
Classe di vento IEC	III A-B
Velocità cut-in	3 m/s
Velocità nominale	11 m/s
Velocità cut-out	25 m/s
Velocità nominale rotore	8,8 rpm
Velocità massima rotore	10,6 rpm

Nell'immagine seguente è rappresentata una turbina con rotore di diametro pari a 170 m e potenza fino a 6,0 MW:

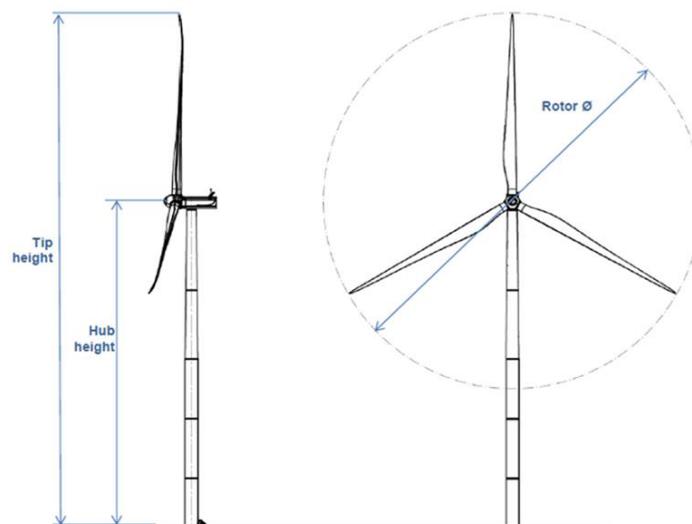


Figura 5-1: Vista e caratteristiche di un aerogeneratore da 6,0 MW

Un importante fattore per il calcolo della gittata massima è il raggio baricentrico (r_g). Per il calcolo della gittata, è necessario descrivere il moto parabolico nel centro di massa del corpo. Data la disomogenea distribuzione di massa lungo la pala, una buona approssimazione è considerare che il baricentro di pala è circa a 1/3 della lunghezza di pala. Dunque, per gli aerogeneratori oggetto

del presente studio, il raggio baricentrico si trova a una distanza dal centro del mozzo pari a:
 $(83,5/3) + (85 - 83,5) = 29,33 \text{ m}$.

Nel baricentro vengono quindi descritte la velocità angolare, la velocità periferica ed il moto parabolico. Una volta individuata la gittata massima al raggio baricentrico sarà possibile individuare la gittata massima al "tip" della pala, sommando la lunghezza che vi è tra il "tip" e il raggio baricentrico.

Per il calcolo della gittata è stato ipotizzato un numero di giri pari a 10,6 rpm, valore riscontrato da dati tecnici dell'aerogeneratore.

5.3 Calcolo della gittata massima

In questo paragrafo viene riportato il calcolo della gittata massima in accordo alle ipotesi definite al paragrafo 5.1 e per l'aerogeneratore di riferimento definito al paragrafo 5.2.

Il primo passo per il calcolo della gittata massima è la descrizione delle leggi orarie del moto parabolico della pala distaccata. Considerando che la massa e la geometria sono concentrate in un punto (baricentro), che il corpo si trova in un campo di gravità uniforme ed indipendente dal tempo e che si trascurano le forze di attrito legate alla resistenza dell'aria, si applicano le seguenti equazioni di moto:

$$\begin{cases} x(t) = x_o + v_{gx}t \\ y(t) = y_o + v_{gy}t - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (5.1)$$

Dove:

- x_o e y_o sono le posizioni iniziali della pala al momento del distacco. Esse dipendono dall'angolo di distacco e dal raggio baricentrico;
- v_{gx} e v_{gy} sono rispettivamente la componente orizzontale e verticale della velocità iniziale di distacco v_g , definita al raggio baricentrico. La velocità di distacco v_g si calcola a partire dalla velocità angolare " ω " (e quindi dal numero di giri al minuto della turbina " n ") e dal raggio baricentrico " r_g " come di seguito:

$$v_g = \omega \cdot r_g = \frac{2\pi n}{60} \cdot r_g = 32,56 \text{ m/s} \quad (5.2)$$

- g è la costante di gravitazione universale pari a $9,81 \text{ m/s}^2$
- t è la variabile tempo. Impostando $y(t) = 0$ (corpo arrivato a terra), si ottiene di conseguenza il tempo di volo e la condizione in cui calcolare la gittata.

Per prima cosa, è quindi necessario definire le posizioni iniziali e le velocità del corpo distaccato. Il moto parabolico del corpo viene descritto in Figura 5-2, dove il rotore della turbina eolica (fino al raggio baricentrico) è rappresentato con il cerchio blu:

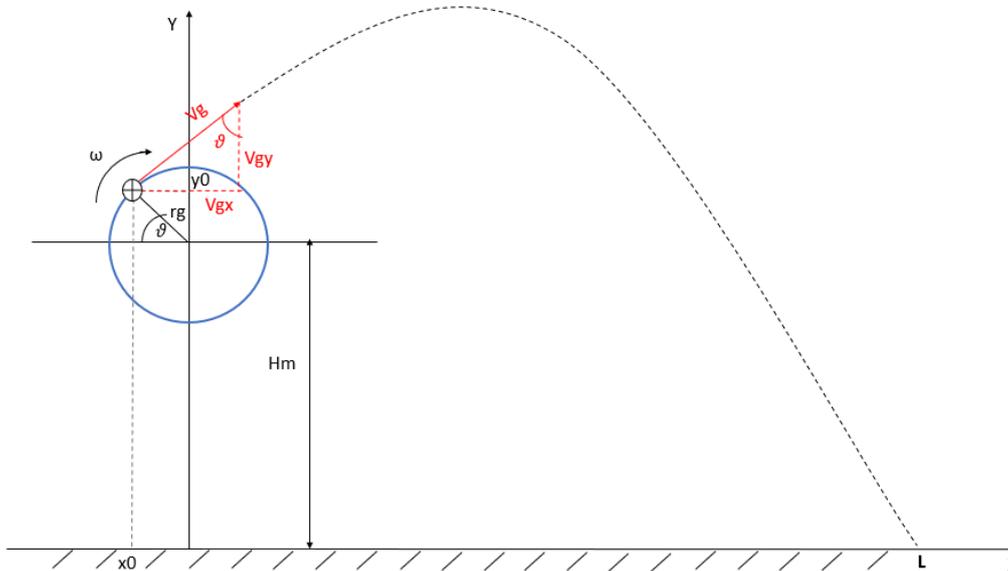


Figura 5-2: Traiettoria della pala distaccata

Come visibile dalla Figura 5-2, le posizioni iniziali (x_o e y_o) e le componenti (v_{gx} e v_{gy}) della velocità di distacco v_g dipendono strettamente dal raggio baricentrico r_g , dall'altezza di mozzo H_m , e dall'angolo di distacco ϑ definito in senso orario tra l'asse della pala e l'orizzontale. Essendo l'angolo di distacco variabile nel tempo, è necessario calcolare la gittata al variare dell'angolo di distacco per evidenziare quale è la condizione in cui si ottiene la massima gittata.

Si definiscono quindi:

- Le posizioni iniziali (x_o e y_o) come:

$$x_o = -r_g \cos \vartheta ; y_o = H_m + r_g \sin \vartheta \quad (5.3)$$

- Le componenti (v_{gx} e v_{gy}) della velocità di distacco v_g come:

$$v_{gx} = v_g \sin \vartheta ; v_{gy} = v_g \cos \vartheta \quad (5.4)$$

Sono state quindi definite le condizioni iniziali del distacco di pala. È necessario ora, a partire dalle equazioni di moto (5.1), ottenere i valori di Tempo di volo (T) e Gittata (L) definiti sul baricentro della pala distaccata.

Imponendo $y(t) = 0$ nell'equazione 5.1, condizione a cui corrisponde il raggiungimento a terra del corpo dopo il volo, e avendo definito le condizioni iniziali nelle equazioni 5.3 e 5.4, si possono calcolare quindi la gittata L e il tempo di volo T:

$$\begin{cases} L = x_o + v_{gx}T \\ 0 = y_o + v_{gy}T - \frac{1}{2}gT^2 \end{cases} \quad (5.5)$$

Risolvendo la seconda equazione di secondo grado nella variabile T e trascurando i risultati dell'equazione che evidenziano tempi negativi, si può quindi ottenere il valore del tempo di volo T , pari a:

$$T [s] = \frac{v_{gy} + \sqrt{v_{gy}^2 + 2gy_o}}{g} = \frac{v_g \cos \vartheta + \sqrt{(v_g \cos \vartheta)^2 + 2g \cdot (H_m + r_g \sin \vartheta)}}{g} \quad (5.6)$$

Definito il tempo di volo T , dalla prima equazione (5.5), si ottiene quindi la gittata L , definita nel baricentro di pala:

$$L [m] = x_o + v_{gx}T = -r_g \cos \vartheta + v_g \sin \vartheta \cdot \left(\frac{v_g \cos \vartheta + \sqrt{(v_g \cos \vartheta)^2 + 2g \cdot (H_m + r_g \sin \vartheta)}}{g} \right) \quad (5.7)$$

Ottenuta la gittata nel baricentro di pala L , per ottenere la gittata al "tip" della pala, è sufficiente sommare la distanza tra il "tip" della pala ed il raggio baricentrico ($2/3 r_{tip}$):

$$L_{tip} = L + \frac{2}{3}r_{tip} \quad (5.8)$$

Come già evidenziato, tutte le grandezze definite precedentemente dipendono dall'angolo di distacco ϑ , variabile nel tempo. Vengono quindi riportati di seguito un riassunto delle ipotesi di calcolo ed i valori di gittata ottenuti al variare dell'angolo ϑ , al fine di individuare la gittata massima e l'angolo a essa corrispondente.

5.4 Risultati

I valori assunti per il calcolo della gittata nella presente analisi sono i seguenti:

- Lunghezza di Pala r_{tip} : 83,5 m;
- Altezza mozzo H_m : 125 m;
- Velocità massima rotore: 10,6 rpm;
- Diametro del Rotore D : 170 m;
- Raggio baricentrico r_g : $83,5/3 + 170/2 - 83,5 = 29,33$ m (distanza tra centro mozzo e 1/3 della lunghezza di pala).

Sono riportati di seguito i valori ottenuti di gittata massima, al variare dell'angolo di distacco ϑ :

Tabella 3: Risultati calcolo gittata massima

Angolo di distacco θ [°]	Posizione iniziale baricentro		Componenti v_g		Tempo di Volo T [s]	Gittata L [m]	Gittata @ tip L_{tip} [m] X_0
	X_0	Y_0	V_{gx} [m/s]	V_{gy} [m/s]			
0	-29,33	125,00	0,00	32,56	9,36	-29,33	26,33
5	-29,22	127,56	2,84	32,44	9,38	-2,59	53,08
10	-28,89	130,09	5,65	32,07	9,37	24,08	79,75
15	-28,33	132,59	8,43	31,45	9,31	50,16	105,83
20	-27,56	135,03	11,14	30,60	9,22	75,15	130,81
25	-26,59	137,40	13,76	29,51	9,10	98,58	154,25
30	-25,40	139,67	16,28	28,20	8,94	120,07	175,74
35	-24,03	141,82	18,68	26,67	8,74	139,28	194,95
40	-22,47	143,86	20,93	24,94	8,53	155,96	211,63
45	-20,74	145,74	23,02	23,02	8,28	169,94	225,60
50	-18,86	147,47	24,94	20,93	8,02	181,12	236,78
55	-16,82	149,03	26,67	18,68	7,74	189,50	245,16
60	-14,67	150,40	28,20	16,28	7,44	195,14	250,81
65	-12,40	151,59	29,51	13,76	7,14	198,19	253,86
70	-10,03	152,56	30,60	11,14	6,83	198,84	254,51
75	-7,59	153,33	31,45	8,43	6,52	197,34	253,01
80	-5,09	153,89	32,07	5,65	6,21	193,95	249,61
85	-2,56	154,22	32,44	2,84	5,90	188,95	244,62
90	0,00	154,33	32,56	0,00	5,61	182,64	238,31
95	2,56	154,22	32,44	-2,84	5,33	175,30	230,97
100	5,09	153,89	32,07	-5,65	5,05	167,17	222,84
105	7,59	153,33	31,45	-8,43	4,80	158,49	214,15
110	10,03	152,56	30,60	-11,14	4,56	149,44	205,11
115	12,40	151,59	29,51	-13,76	4,33	140,20	195,86
120	14,67	150,40	28,20	-16,28	4,12	130,88	186,55
125	16,82	149,03	26,67	-18,68	3,93	121,59	177,25
130	18,86	147,47	24,94	-20,93	3,75	112,39	168,06
135	20,74	145,74	23,02	-23,02	3,59	103,35	159,01
140	22,47	143,86	20,93	-24,94	3,44	94,47	150,14
145	24,03	141,82	18,68	-26,67	3,31	85,78	141,45
150	25,40	139,67	16,28	-28,20	3,19	77,28	132,95
155	26,59	137,40	13,76	-29,51	3,08	68,96	124,63
160	27,56	135,03	11,14	-30,60	2,98	60,81	116,47
165	28,33	132,59	8,43	-31,45	2,90	52,79	108,46
170	28,89	130,09	5,65	-32,07	2,83	44,89	100,56
175	29,22	127,56	2,84	-32,44	2,77	37,09	92,75
180	29,33	125,00	0,00	-32,56	2,72	29,33	85,00

Dall'analisi si può evidenziare che la massima gittata si ottiene per un angolo di distacco θ pari a 70° ed è pari a 254,51 m.

Si riporta di seguito il grafico che mostra la gittata al "tip" in funzione dell'angolo di distacco:

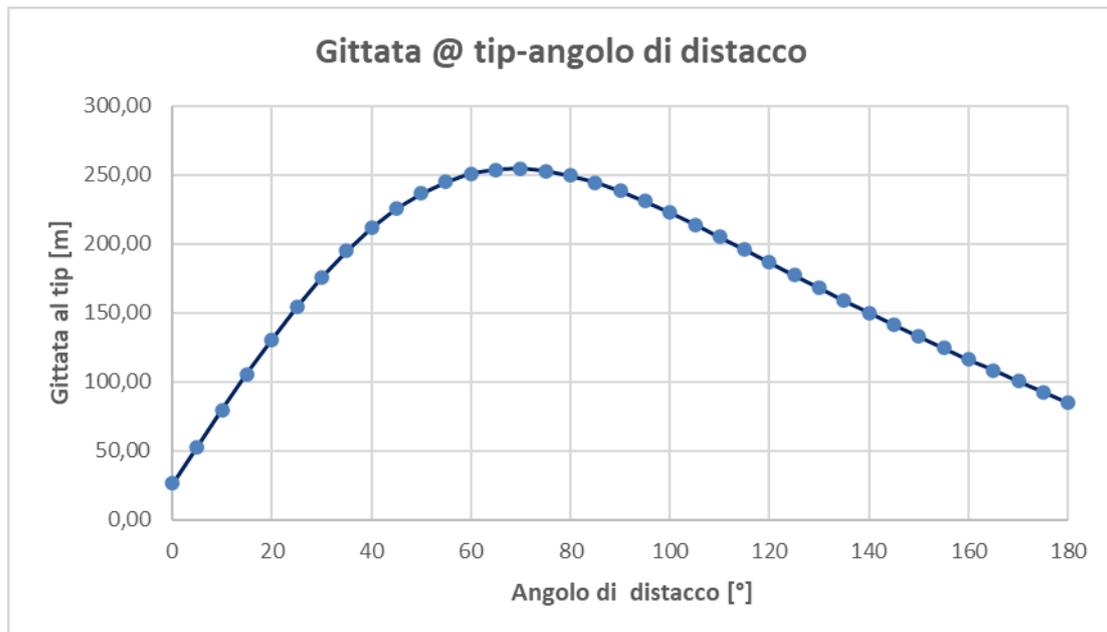


Figura 5-3: Gittata al tip vs. angolo di distacco

6 CONCLUSIONI

Di seguito viene riportata l'analisi degli elementi sensibili all'eventuale rottura di una pala dell'impianto in progetto.

In particolare, per ciascuna delle posizioni proposte degli aerogeneratori di nuova costruzione si riporta in tabella la distanza del recettore sensibile "RC" più vicino (unità abitativa) e la distanza dalla strada provinciale o regionale più vicina.

Tabella 4: Distanza tra aerogeneratori di progetto ed elementi sensibili

WTG	Distanza da recettore sensibile più vicino	Distanza da strada provinciale/regionale più vicina
CO01	>500 m	Circa 500 m da SP53 Circa 440 m da strada consortile
CO02	>500 m	Circa 210 m da SP53
CO03	>500 m	>500 m
CO04	>500 m	>500 m
CO05	>500 m	Circa 320 m da SP5
CO06	>500 m	Circa 350 m da SP5
CO07	>500 m	>500 m
CO08	>500 m	Circa 354 m da SP52

Come visibile dalla tabella, la distanza tra gli aerogeneratori e gli elementi sensibili è superiore alla gittata massima. Inoltre, con l'eccezione dell'aerogeneratore CO02, situato a circa 210 metri dalla strada provinciale SP53, le distanze con le strade provinciali e regionali più vicine sono superiori a quella ipotizzata per la gittata massima.

In relazione alla possibile collisione tra un elemento rotante distaccato dall'aerogeneratore CO02 ed un ipotetico bersaglio in transito sulla SP53, si sottolinea che, al netto delle assunzioni altamente conservative fatte in sede di simulazione del calcolo della gittata, la probabilità di accadimento è ulteriormente mitigata dal fatto che la pala dovrebbe distaccarsi esattamente in direzione della strada e che l'area di collisione coincida nel tempo e nello spazio con la traiettoria percorsa dal bersaglio: difatti, a differenza di un classico recettore sensibile, che è sempre collocato in un punto dello spazio, la probabilità che la pala dopo il distacco collida con un'autovettura in transito è a sua volta funzione della densità di traffico, pertanto le probabilità sono da considerarsi ulteriormente ridotte.

Inoltre, e questo resta valido anche in linea generale, si fa notare per il calcolo della gittata massima sono state considerate le ipotesi particolarmente cautelative che vengono di seguito riepilogate:

- Per la simulazione della gittata massima sono stati considerati solamente gli effetti gravitazionali sul moto e non gli effetti di attrito di aria e vento;
- La caduta della pala è considerata sempre orizzontale per tutta la lunghezza: non sono stati considerati effetti di moto rotazionale complesso o effetti tangenziali che tenderebbero a ridurre i valori di gittata massima potenziale;
- La velocità di rotazione al momento del distacco è stata considerata coincidente con quella massima ammissibile dell'aerogeneratore. Questa velocità non dovrebbe mai essere raggiunta grazie ai meccanismi di cut out.

In virtù delle ipotesi conservative del calcolo, il valore di gittata teorico calcolato è superiore al valore reale; inoltre, la probabilità che il rotore, distaccandosi, percorra esattamente la traiettoria ottimale per l'impatto con un ipotetico elemento sensibile è molto bassa e garantisce una riduzione del rischio a priori.