



AGOSTO 2022

TORCELLO WIND S.r.l.

IMPIANTO EOLICO TORCELLO

PROVINCIA DI VITERBO

COMUNE DI BAGNOREGIO E LUBRIANO

Montana

**ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA
ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI
– GITTATA MASSIMA**

Progettista

Ing. Laura Maria Conti – Ordine Ing. Prov. Pavia n.1726

Coordinamento

Corrado Pluchino

Codice elaborato

2799_4680_R18_Rev0_Relazione gittata massima



Memorandum delle revisioni

Cod. Documento	Data	Tipo revisione	Redatto	Verificato	Approvato
2799_4680_R18_Rev0_Relazione gittata massima	08/2022	Prima emissione	GF	C. Pluchino	L. Conti

Gruppo di lavoro



Nome e cognome	Ruolo nel gruppo di lavoro	N° ordine
Laura Conti	Direttore Tecnico - Progettista	Ord. Ing. Prov. PV n. 1726
Corrado Pluchino	Coordinamento Progettazione	Ord. Ing. Prov. MI n. A27174
Daniele Crespi	Coordinamento SIA	
Riccardo Festante	Tecnico competente in acustica	ENTECA n. 3965
Mauro Aires	Ingegnere Civile – Progettazione Strutture	Ord. Ing. Prov. Torino – n. 9583J
Matteo Lana	Ingegnere Ambientale	
Giuseppe Ferranti	Architetto – Progettazione Civile	Ord. Arch. Prov. Palermo – Sez. A Pianificatore Territoriale n. 6328
Sergio Alifano	Architetto	
Fabio Lassini	Ingegnere Civile Ambientale – Progettazione Civile	Ord. Ing. Prov. MI n. A29719
Vincenzo Gionti	Ingegnere Civile Ambientale – Progettazione Civile	
Andrea Fronteddu	Ingegnere Elettrico – Progettazione Elettrica	Ord. Ing. Cagliari n. 8788 – Sez. A
Matthew Piscedda	Esperto in Discipline Elettriche	
Davide Lo Conte	Geologo	Ordine Geologi Umbria n.445

Parco Eolico Torcello – Comune di Bagnoregio e Lubriano (VT)

analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti – gittata massima



Riccardo Baecker	Ingegnere Ambientale	
Elena Comi	Biologa – Esperto GIS – Esperto Ambientale	Ord. Nazionale Biologi n. 060746 Sez. A
Matteo Cuda	Naturalista	
Marco Corrà	Architetto	
Francesca Jaspardo	Esperto Ambientale	
Fabrizio Columbro	Ingegnere Ambientale	
Luca Morelli	Ingegnere Ambientale	

Montana S.p.A.

Via Angelo Carlo Fumagalli 6, 20143 Milano

Tel. +39 02 54 11 81 73 | Fax +39 02 54 12 98 90

Milano (Sede Certificata ISO) | Brescia | Palermo | Cagliari | Roma

C. F. e P. IVA 10414270156

Cap. Soc. 600.000,00 €

www.montanambiente.com





INDICE

1. PREMESSA.....	5
1.1. DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO.....	5
2. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI.....	7
2.1. APPROCCIO AL CALCOLO	7
2.2. IPOTESI DI CALCOLO	8
2.3. FORMULAZIONI	9
2.4. GEOMETRIA DEL PROBLEMA E CALCOLO DELLA GITTATA	10
2.5. CASI STUDIO.....	12
2.6. CONSIDERAZIONI FINALI	13
3. APPLICAZIONE DEI RISULTATI ALL’IMPIANTO EOLICO IN OGGETTO	14
4. CONCLUSIONI	17



1. PREMESSA

In riferimento al progetto per la realizzazione di un impianto eolico costituito da 7 turbine per potenza complessiva pari a 42 MW, e relative opere di connessione alla RTN, da ubicare nei Comuni di Bagnoregio (VT) e Lubriano, nell'area nord occidentale della regione Lazio sviluppato dalla società Torcello Wind S.r.L., con il presente studio si intende valutare la massima distanza (gittata) che la pala di un aerogeneratore avente altezza hub pari a 115 m e diametro del rotore pari a 170 m potrebbe compiere, nell'ipotesi di improvviso distacco dal punto di serraggio sul mozzo, punto maggiormente sollecitato in quanto costituisce il collegamento della pala al rotore.

Si vuole dunque individuare la massima circonferenza all'interno della quale è possibile che la pala ricada in caso di distacco dal mozzo.

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo in esame, sono le più gravose possibili, in modo da investigare nella situazione maggiormente cautelativa.

1.1. DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO

Oggetto della presente relazione è l'analisi della gittata degli elementi rotanti di un aerogeneratore nello specifico "Siemens Gamesa SG 6.0-170" da installare nel parco eolico ubicato nei Comuni di Bagnoregio (VT) e Lubriano, nell'area nord occidentale della regione Lazio, costituito da n. 7 aerogeneratori per una potenza complessiva pari a 42 MW.

Le principali specifiche tecniche dell'aerogeneratore sono state fornite dal committente e vengono riportate nella seguente tabella:

**AEROGENERATORE Siemens Gamesa SG 6.0-170**

DATI DI FUNZIONAMENTO	
Potenza nominale	5.600 – 5.700 kW
Velocità minima del vento	3.0m/s
Velocità massima del vento	20.0 m/s
Classe di vento–IEC	IIIA
ROTORE	
Diametro del rotore	170 m
Area spazzata	22698 m ²
Velocità angolare massima	10 giri/min
TORRE	
Tipo	torre in acciaio tubolare
Altezza mozzo	115 m
Altezza al Tip	200 m
PALA	
Lunghezza	83 m
Numero pale	3
DATI ELETTRICI	
Frequenza	50Hz/60Hz
Tipo generatore	doubly-fed asynchronous three phase generator

Tabella 1 – Caratteristiche tecniche turbina Siemens Gamesa SG 6.0-170

2. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

2.1. APPROCCIO AL CALCOLO

La pala che durante la rotazione accidentalmente si distacca dal rotore è caratterizzata da una velocità iniziale V_0 proporzionale alla velocità angolare del rotore ed al diametro rotorico. Ai fini del calcolo vengono impiegate, in via preliminare, le formule classiche della cinematica di corpo rigido.

Il moto di un corpo rigido, in assenza di interazione con il fluido, è riconducibile alla somma di due moti, uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale ed uno uniformemente accelerato (con accelerazione pari all'accelerazione di gravità) in direzione verticale. Ne consegue che la traiettoria seguita da un corpo, in generale solido e di dimensioni ridotte, o meglio dal suo centro di massa, ha un andamento parabolico. La gittata è la distanza, sul piano orizzontale, tra la proiezione sullo stesso piano del punto di partenza del moto e il punto in cui esso raggiunge il piano.

La rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore ad asse orizzontale (parallelo al suolo) può essere considerato un evento molto raro, anche in considerazione della tecnologia costruttiva, dei materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse e delle periodiche operazioni di manutenzione e controllo a cui sono soggetti gli aerogeneratori nel corso della loro "vita utile" (con intervalli annuali).

Le pale degli aerogeneratori sono generalmente considerate "fail-safe", in quanto 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 questa analisi verrà presa in considerazione l'ipotesi di distacco completo della pala alla radice. Questa tipologia di incidente, seppur molto poco probabile, nasce dalla considerazione dell'esistenza di un punto di discontinuità costituito dalla giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo, per il quale esiste la possibilità di un cedimento strutturale.

La parte strutturale posizionata all'interno della pala (longherone) è dotata infatti di attacchi filettati (bulloni prigionieri) che consentono il collegamento della pala al mozzo tramite dadi serrati opportunamente in fase di installazione della turbina (Figura 1).

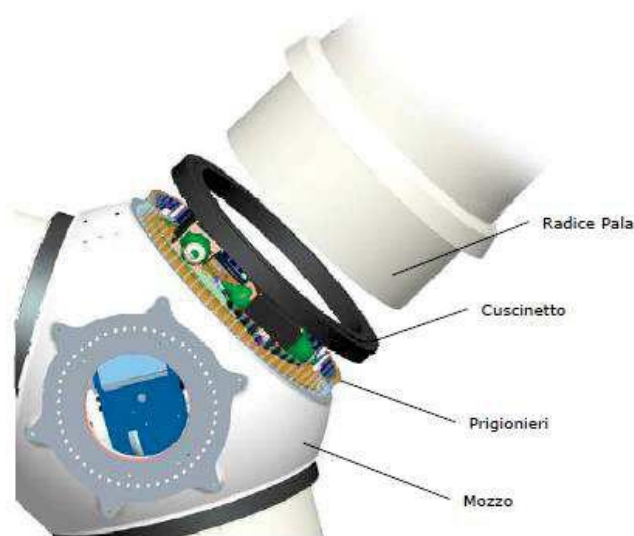


Figura 1 – Mozzo aerogeneratore

Durante il funzionamento dell'aerogeneratore i bulloni prigionieri offrono una resistenza ai carichi sia statici sia affaticanti che è strettamente legata al precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio in fase di installazione.



Come detto, la giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo costituisce la più probabile “sezione” di rottura e, tra le operazioni di manutenzione programmate per la turbina con cadenza annuale, è previsto un controllo periodico del serraggio dei bulloni e del precarico imposto ai prigionieri finalizzato alla verifica dei valori imposti dal progettista.

C'è da dire che la condizione di carico critica è rappresentata dai carichi affaticanti, che, su base annuale, considerate le velocità massime di rotazione delle turbine, ovvero la frequenza del carico affaticante, in fase di progetto sono tenuti ben al di sotto dei carichi limite di fatica valutati per i bulloni.

Di conseguenza, l'ipotetico distacco di una pala dal rotore potrebbe essere causato da incorretti interventi di manutenzione periodica, durante i quali l'errata verifica delle condizioni di serraggio potrebbero determinare la rottura accidentale di uno o più prigionieri ed al distacco parziale o totale della pala.

È necessario evidenziare come per gli aerogeneratori di nuova generazione ogni pala è fissata al rotore da un numero di bulloni prigionieri compreso tra 50 e 80, pertanto è altamente improbabile l'ipotesi della rottura contemporanea di tutti i prigionieri (condizione che solo in linea teorica comporterebbe il distacco totale della pala). Avrebbe molto più senso, invece, ipotizzare la rottura di un numero limitato (e nemmeno contemporaneo) di bulloni prigionieri. Sotto tale ipotesi, considerando la struttura di un aerogeneratore, l'ancoraggio non perfetto di una delle pale produrrebbe, col moto rotatorio della fase di funzionamento, un disequilibrio e delle oscillazioni indotte all'asse del rotore, fenomeno che porterebbe ad un'immediata risposta da parte dei sistemi di controllo automatici dell'aerogeneratore che in tempi estremamente ridotti ridurrebbero la velocità di rotazione, fino all'arresto, annullando così la possibilità di distacco della pala.

2.2. IPOTESI DI CALCOLO

Il calcolo della gittata massima delle pale eoliche può essere svolto mediante lo sviluppo di modelli matematici basati sulle formule classiche della cinematica di corpo rigido:

- in moto piano (piano ortogonale all'asse del rotore nelle condizioni di esercizio al momento del distacco, ossia piano di appartenenza del vettore velocità tangenziale del baricentro della pala al momento del distacco),
- in assenza di forzanti (moto inerziale), come ad esempio quelle generate dal vento (ritenute trascurabili nella zona di installazione degli aerogeneratori oggetto della relazione),
- in assenza di variazioni altimetriche significative del campo di installazione (campo piano).

L'impiego di tali formule nelle ipotesi sopra descritte consente la stima, teorica e conservativa, della traiettoria delle pale a seguito di eventuali rotture alla radice. L'affinamento dei modelli matematici con opportune integrazioni, volte prevalentemente all'implementazione degli effetti che derivano dall'interazione pala-aria e/o direzione del vento differente rispetto a quella considerata in fase di progettazione e installazione degli aerogeneratori, consentirebbe di aumentare i margini di sicurezza salvaguardando ad ogni modo le aree circostanti.

In generale, la forza di attrito viscoso dipende, oltre che dalla velocità, anche dal fluido in cui l'oggetto si muove, dalla forma e dalle dimensioni dell'oggetto in movimento che inducono la formazione di vortici nel fluido stesso. Finché le velocità sono ridotte, il flusso dell'aria intorno alla pala è laminare e la forza di attrito viscoso tra corpo in movimento e aria cresce in modo direttamente proporzionale alla sua velocità. Nella trattazione si trascura l'effetto portante del vento sulla traiettoria della pala distaccata, considerati i modesti valori delle velocità del vento che interessano l'area di installazione, come deducibile dall'atlante eolico d'Italia (Figure 2 e 3) ed in particolare dalla mappa delle velocità elaborata da RSE. Si trascura altresì l'eventualità che si verificano nell'area di installazione fenomeni vorticosi. In ogni caso, eventuali forzanti generate dal vento, considerata la condizione normale di funzionamento dell'aerogeneratore, per la quale l'asse del rotore è costantemente allineato con la direzione del vento, devierebbero la traiettoria fuori dal piano ipotizzato del moto, riducendone la gittata massima.

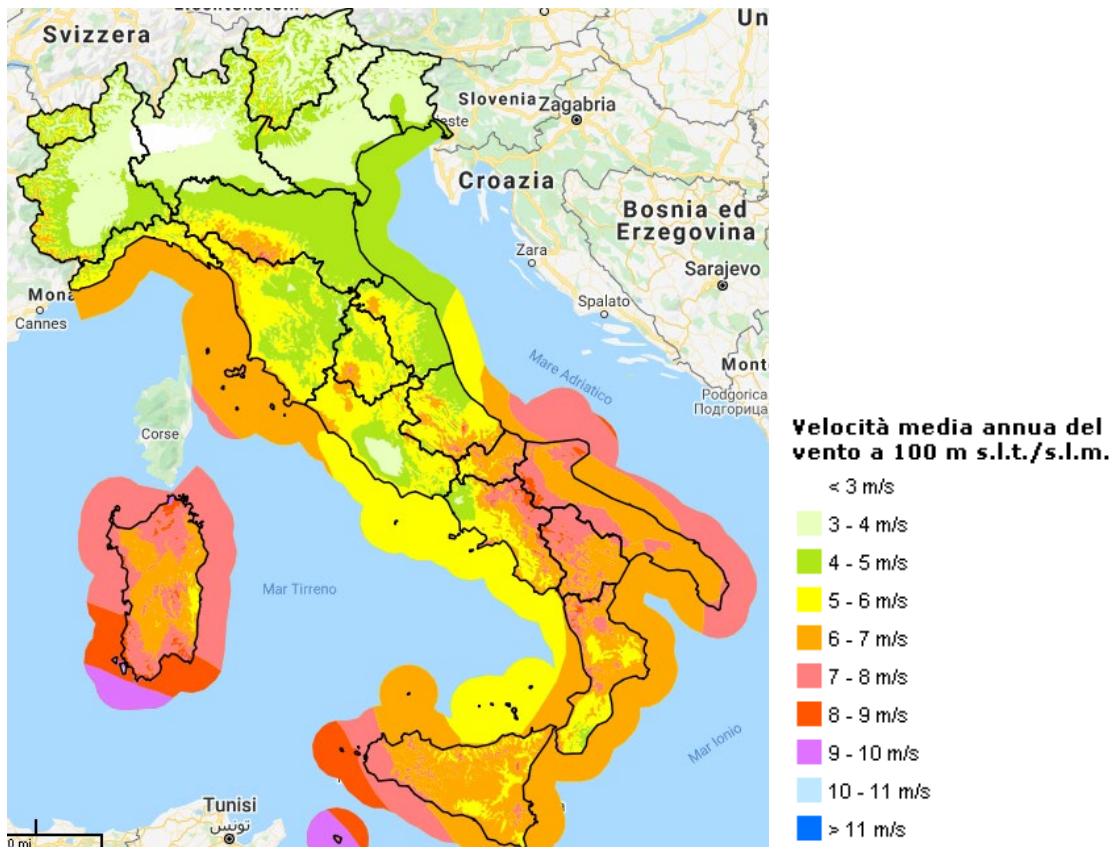


Figura 2 – Atlante eolico d'Italia

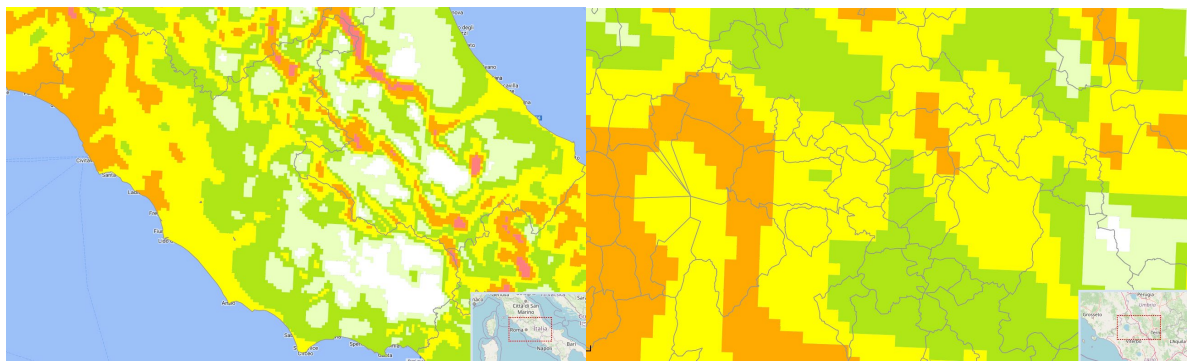


Figura 3 – Venti medi annui Comune di Bagnoregio e Lubriano (VT)

2.3. Formulazioni

Calcolo della Gittata di Pala Eolica per il modello **Siemens Gamesa SG 6.0-170**

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

$$x'' = 0$$

$$y'' = -g$$

dove $g = 9,1 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità. La legge del moto, soluzione di queste equazioni è

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

$$y(t) = y_0 + v_y t - 1/2 g t^2$$



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 tale che $y(T) = 0$.

Dalla legge del moto si ottiene

$$T = v_y/g + 1/gv(v_y^2 + 2 y_0 g)$$

scartando la soluzione corrispondente a tempi negativi.

2.4. Geometria del problema e calcolo della gittata

Consideriamo 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.

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 2π radianti, per n giri avremo $2\pi n$ radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare ω del corpo in movimento.

Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

$$\omega = 2\pi n/60 \text{ rad/sec}$$

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ad una distanza dal centro di rotazione pari a circa $r_g = 28,67 \text{ m}$ essendo il diametro del rotore $D = 170 \text{ m}$ ed il raggio di ciascuna pala $R = 83 \text{ m}$

Per determinare la velocità del baricentro della pala basta moltiplicare la distanza del baricentro dal centro di rotazione per la velocità angolare.

la velocità massima del rotore è pari a 10 giri/minuto .

Per questa velocità angolare, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a

$$V_g = \omega r_g = 2\pi n/60 r_g = 30,02 \text{ m/sec}$$

Tenendo conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza, il valore della velocità del baricentro risulta ridotta del 25% rispetto all'assenza di resistenze, per cui il valore reale è $24,02 \text{ m/s}$.

La posizione e la velocità iniziale sono determinati, oltre che dalla velocità tangenziale appena calcolata, anche dall'angolo ϑ della pala al momento del distacco.

Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$x_0 = -r_g \cos(\vartheta)$$

$$y_0 = H + r_g \sin(\vartheta)$$

$$v_x = V_g \sin(\vartheta)$$

$$v_y = V_g \cos(\vartheta)$$

La gittata L è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo della pala; l'altezza H è l'altezza del mozzo della torre 115 m

pertanto $H = 115,00 \text{ m}$.

Dalla legge del moto otteniamo:

$$L = x(T)$$

Sostituendo l'espressione per T ricavata sopra, otteniamo la gittata L in termini di V_g e di ϑ :

$$L = -r_g \cos(\vartheta) + V_g \sin(\vartheta)/g [V_g \cos(\vartheta) + v(\sqrt{V_g^2 \cos^2(\vartheta) + 2(H + r_g \sin(\vartheta))g})]$$

Nella formula di L sopra riportata, si assumono i seguenti dati:

$$V_g = 24,02 \text{ m/s}$$

$$r_g = 28,67 \text{ m}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$H = 115 \text{ m}$$

Il valore massimo della gittata dipenderà dall'angolo ϑ .

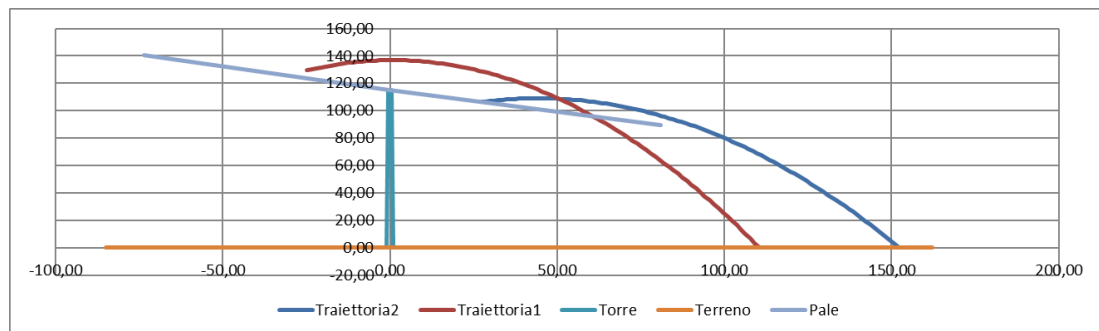
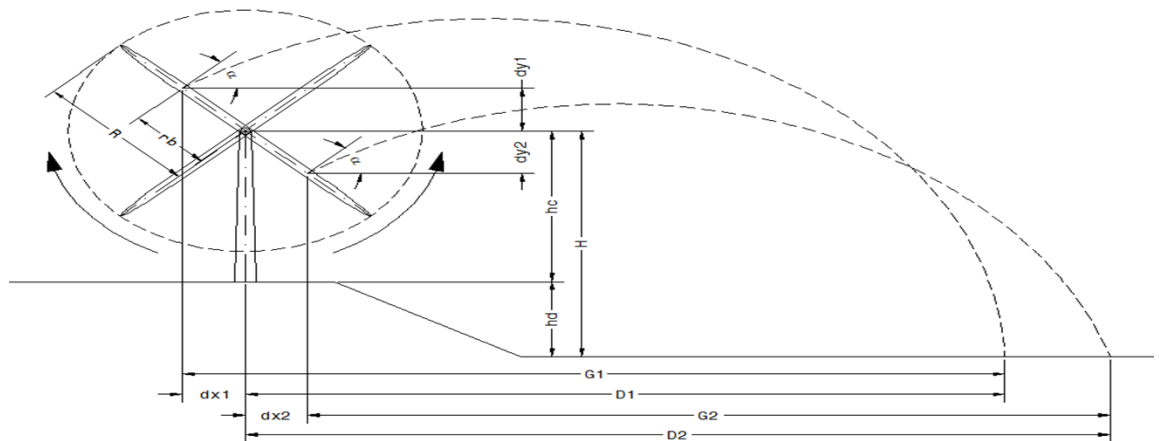


Figura 4 – Calcolo Gittata

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

Come si evidenzia dal grafico, il valore massimo della gittata per la traiettoria 2 è pari a 152,21 m circa con un angolo di distacco di circa $\vartheta = 18^\circ$ circa

Pertanto, nell'ipotesi di distacco di una pala nel punto di serraggio del mozzo, punto di maggiore sollecitazione a causa del collegamento, considerando le seguenti ipotesi:

- il baricentro della pala è posizionato ad 1/3 rispetto alla lunghezza della pala;
- il moto del sistema è considerato di tipo rigido non vincolato;
- le componenti dell'accelerazione saranno $a_x = 0, a_y = -g$.
- la velocità periferica è uguale a quella calcolata in precedenza (pari alla velocità angolare massima del rotore)

Il massimo valore della gittata sarà pari al valore calcolato in precedenza, 152,21m circa, per $\vartheta = 18^\circ$ circa, Supponendo di prendere in considerazione sempre quella più pericolosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, il vertice della pala cadrà a (152,21+62,25) 214,46 m, in cft **Ltot = 220 m**



2.5. Casi Studio

Di seguito si riporta il calcolo delle gittate per il caso studio:

- **Siemens Gamesa SG 6.0-170** aventi altezza al mozzo pari a 115 m e diametro rotorico pari a 170 m.

Considerati i tipici profili aerodinamici delle pale degli aerogeneratori, si ipotizza il baricentro della pala posizionato ad 1/3 della lunghezza, in prossimità del mozzo.

In Tabella 2 si riporta la gittata massima calcolata in riferimento alle formule classiche della cinematica considerando l'ipotesi di moto roto-traslatorio, con rotazione intorno all'asse perpendicolare al piano individuato dal vettore velocità tangenziale (piano ortogonale all'asse del rotore in condizioni di esercizio) e traslazione nello stesso piano, sommando alla gittata l'aliquota corrispondente alla lunghezza della pala dalla parte più lontana dal baricentro verso l'esterno.

Modello Siemens Gamesa SG 6.0-170
Lunghezza pala [m] 83.00
Velocità rotazione [rpm] 10
Altezza mozzo [m] 115.00
Posizione baricentro rispetto al mozzo [m] 28.67
Gittata massima [m] 214,46 (152,21 + 62,25)
Angolo di distacco [°] 18

In (Figura 5) si riporta il grafico delle gittate massime calcolate in funzione dell'angolo θ di rotazione al quale avviene il distacco.

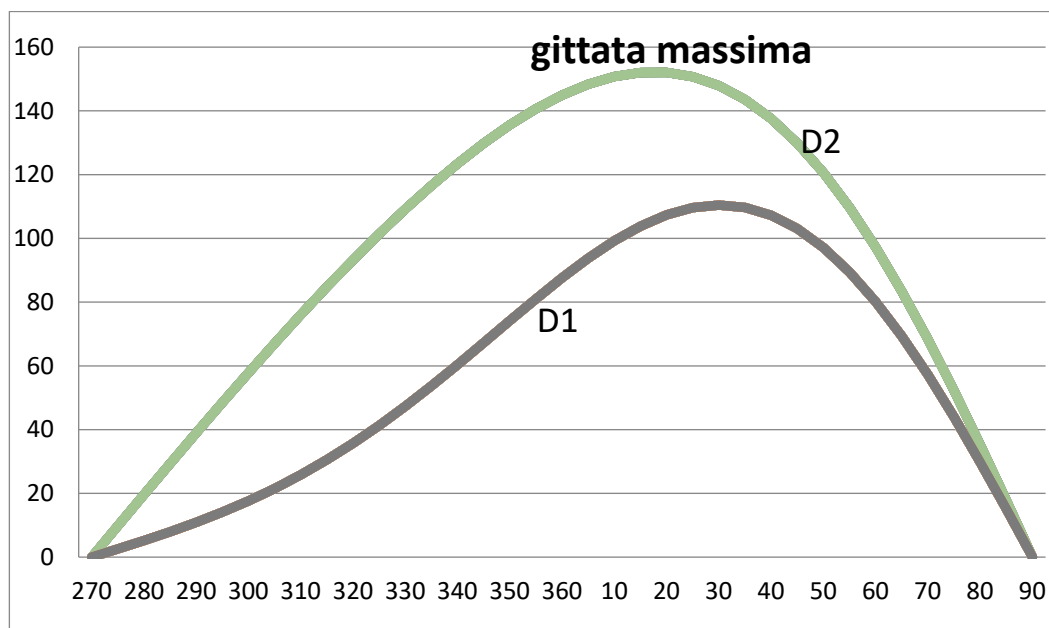


Figura 5 – Calcolo gittata massima [m] vs. angolo di distacco [°]

Va aggiunto che, in termini di sollecitazione, le posizioni più critiche dal punto di vista strutturale assunte dalla pala corrispondono, rispetto al sistema di riferimento, a quelle $\vartheta=90^\circ$, quando gli sforzi di flessione sono massimi, e $\vartheta=180^\circ$, quando è massimo il contributo gravitazionale:



- gli sforzi di flessione a cui è soggetta la pala sono massimi per $\theta=90^\circ$ e sono trasferiti ai bulloni sotto forma di sforzi di trazione, per i bulloni posti al di sopra dell'asse neutro, e di compressione per quelli al di sotto dell'asse neutro;
- il contributo gravitazionale è massimo per $\theta=180^\circ$ ed è trasferito ai bulloni sotto forma di sforzi di trazione.

Il corretto pretensionamento dei bulloni (in riferimento alle coppie di serraggio definite durante la fase di progettazione e alle normative di riferimento -Direttiva 2006/42/CE del 17 maggio 2006) è requisito fondamentale per garantirne l'integrità della giunzione.

Le condizioni di massima sollecitazione per i bulloni di serraggio della pala: $\vartheta=90^\circ$ e $\vartheta=180^\circ$, rispettivamente a flessione e trazione, darebbero luogo a valori della gittata massima decisamente più bassa di quella calcolata in Tabella 2, come è possibile osservare dalla Figura 5.

2.6. Considerazioni finali

Dalle valutazioni effettuate, considerate le ipotesi di campo piano (assenza di variazioni altimetriche del campo di installazione) e moto roto-traslatorio con rotazione intorno all'asse perpendicolare al piano individuato dal vettore velocità tangenziale (piano ortogonale all'asse del rotore in condizioni di esercizio) e traslazione nello stesso piano, si evince un valore della gittata massima *pari a circa 152,21 m* per un angolo di distacco *pari a 18° circa*, al quale dovrà aggiungersi la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno della pala, *62,25 m*, per un valore complessivo $L_{tot} = 214,46 m$ che precauzionalmente arrotondiamo

$$L_{tot} = 220 m.$$

Si evidenzia che, considerato che il verso di rotazione del rotore è sempre orario nel piano (x,z) (ovvero il piano ortogonale all'asse del rotore), la gittata massima si ottiene sempre nel semipiano positivo (xz) ; tale semipiano, in condizioni di esercizio dell'aerogeneratore, è sempre ortogonale alla direzione del vento, purché questo possieda energia sufficiente a consentire il raggiungimento della velocità massima di rotazione delle pale.

Per tale ragione, per lo specifico campo di installazione dell'aerogeneratore oggetto delle valutazioni, nonché per ciascuno degli aerogeneratori installati nel medesimo campo, una attenta valutazione della direzione ed intensità del vento esistente nell'area di installazione, in modo da individuare l'effettiva probabilità di accadimento del distacco dell'intera pala in taluni semipiani, così come definiti sopra; ovvero, si considera, per l'individuazione di tali semipiani, quelli ortogonali alla direzione prevalente del vento nell'area in cui l'aerogeneratore verrà installato, valutando eventualmente, in base ai dati storici disponibili per l'area in esame, l'effettiva probabilità che la rottura si verifichi in un determinato piano in funzione della probabilità di occorrenza di eventi ventosi con velocità sufficiente a generare la rotazione del rotore alla sua massima velocità.

3. APPLICAZIONE DEI RISULTATI ALL'IMPIANTO EOLICO IN OGGETTO

I risultati ed i suggerimenti contenuti nello studio prodotto saranno di seguito applicati nello specifico all'impianto eolico proposto.

In particolare, facendo seguito alle indicazioni del suddetto studio, si andranno ad analizzare gli effetti della rottura degli aerogeneratori all'interno del buffer di 300 m dall'asse della wtg in progetto.







Dall'analisi condotta, si evince che all'interno dei buffer non ricade nessun recettore sensibile.



4. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti evidenziano che, per ciascuno dei 7 aerogeneratori del parco eolico, l'ipotetica gittata della pala non interessa alcun recettore sensibile.

I valori di gittata sono stati ottenuti considerando una riduzione della velocità periferica del 25%, per tener conto delle forze resistenti e dell'attrito dell'aria.

Si ritiene inoltre opportuno evidenziare che, considerato che il verso di rotazione del rotore è sempre orario nel piano (x,z) (ovvero il piano ortogonale all'asse del rotore), la gittata massima si ottiene sempre nel semipiano positivo (xz); tale semipiano, in condizioni di esercizio dell'aerogeneratore, è sempre ortogonale alla direzione del vento, purché questo possieda energia sufficiente a consentire il raggiungimento della velocità massima di rotazione delle pale.

Per tale ragione, per lo specifico campo di installazione degli aerogeneratori oggetto delle valutazioni, una attenta valutazione della direzione ed intensità del vento esistente nell'area di installazione, consente di individuare l'effettiva probabilità di accadimento del distacco dell'intera pala in taluni semipiani, valutata in base ai dati storici disponibili per l'area in esame.

Si rappresenta, infine, che la rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore ad asse orizzontale deve essere, in ogni caso, considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse. Le pale dei rotor 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, infatti, sino a quasi ad annullarla, 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 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.

Seppur statisticamente non rilevante, in teoria le cause di danno ad una pala possono essere prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare è protetto dalla fulminazione in accordo alla norma IEC 61400-24 – livello I.

Si fa presente infine che il calcolo di gittata di frammenti o porzioni di guscio risulta privo di basi computazionali, in quanto lo stabilire le dimensioni reali del pezzo di guscio distaccato è del tutto aleatorio e non dipendente da una causa specifica come quelle collegabili ad una discontinuità, un difetto di progettazione o di realizzazione della pala.

Il caso di distacco di porzioni di pala si potrebbe al più trattare effettuando un'analisi del rischio che è dato dal prodotto fra la probabilità di occorrenza della specifica rottura e la gravità delle conseguenze.

Una simile analisi comporterebbe comunque delle assunzioni arbitrarie fra le quali le dimensioni del pezzo di pala interessato al distacco e uno studio probabilistico sull'occorrenza e la gravità delle conseguenze. Per effettuare queste valutazioni è necessaria la conoscenza di tutta una serie di circostanze circa gli eventi di questo tipo e la base statistica degli eventi incidentali dovrebbe essere notevolmente ampia, la qual cosa non è verificata nella realtà.

Dalle analisi effettuate si può assumere che il fenomeno di rottura degli organi rotanti di un aerogeneratore risulta altamente improbabile per il distacco intero della pala, e che per effetto della fulminazione atmosferica frammenti di pala, solitamente di piccole dimensioni, sono stati ritrovati a non più di 40-50 m dalla base dell'aerogeneratore.

Alla luce delle considerazioni sopra esposte si può affermare che la realizzazione delle turbine nelle aree individuate non costituirebbe pericolo per la pubblica incolumità in caso di distacco di pala dal mozzo del rotore, tutti gli accorgimenti tecnologici previsti per dell'aerogeneratore utilizzato, possono far assumere la gittata in caso di rottura accidentale pari a zero.

