

Sibilla Wind S.r.l.

**Parco Eolico "Sibilla" sito nei comuni di:
Canino e Montalto di Castro (VT) - Manciano (GR)**

**Relazione di calcolo della gittata massima di una pala
di un aerogeneratore**

Novembre 2022



Regione LAZIO comuni di:



Canino (VT)



Montalto di Castro (VT)



Regione TOSCANA comune di:



Manciano (GR)

Committente:

Sibilla Wind S.r.l.

Sibilla Wind S.r.l.

Via Sardegna, 40
00187 Roma
P.IVA/C.F. 16422481008

Titolo del Progetto:

**Parco Eolico "Sibilla" sito nei Comuni di:
Canino e Montalto di Castro (VT) - Manciano (GR)**

Documento:

**Relazione di calcolo della gittata massima
di una pala di un aerogeneratore**

N° Documento:

IT-VESSIB-TEN-SIA-TR-12

Progettista:



sede legale e operativa

San Martino Sannita (BN) Località Chianarile snc Area Industriale

sede operativa

Lucera (FG) via Alfonso La Cava 114

P.IVA 01465940623

Azienda con sistema gestione qualità Certificato N. 50 100 11873



Progettista

Dott. Ing. Nicola FORTE



Rev	Data Revisione	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
00	NOVEMBRE 2022	Richiesta AU	MMG	PM	NF

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESSIB-TEN-SIA-TR-12 02/11/2022 02/11/2022 01 2 di 11
---	--	---	--

Sommario

1	INTRODUZIONE	3
2	METODOLOGIA DI CALCOLO DELLA GITTATA	5
3	CALCOLO DELLA GITTATA PER L'AEROGENERATORE DI PROGETTO	10
4	COMPATIBILITÀ DEL PROGETTO IN RELAZIONE AGLI ELEMENTI ANTROPICI PRESENTI.....	11
5	CONCLUSIONI.....	11

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESSIB-TEN-SIA-TR-12 02/11/2022 02/11/2022 01 3 di 11
---	--	---	--

1 INTRODUZIONE

Il progetto descritto nella presente relazione riguarda la realizzazione di un impianto eolico costituito da 9 aerogeneratori della potenza di 7.2 MW ciascuno, per una potenza di 64,8 MW da installare nei comuni di Montalto di Castro (VT) e Canino (VT) in località "Parco San Nicola" e "Villa Abbado", con opere di connessione alla rete di trasmissione nazionale ricadenti nel comune di Manciano (GR) in località "Cerquanella". Proponente dell'iniziativa è la società Sibilla Wind Srl.

L'area d'installazione si colloca a nord est del centro di Montalto di Castro da cui dista circa 5 km in linea d'area, e a sud/est del centro di Canino dal quale dista circa 8,5 km in linea d'aria. Nel dettaglio, gli aerogeneratori denominati T01-T03-T04-T05-T06-T07-T08-T09 ricadono sul territorio di Montalto di Castro interessando i fogli catastali n.33-34-55, mentre l'aerogeneratore denominato T02 ricade sul territorio di Canino interessando il foglio catastale n.85.

Gli aerogeneratori sono collegati tra di loro mediante un cavidotto in media tensione interrato a 30 kV che sarà posato principalmente al di sotto di viabilità esistente di progetto e trasferirà l'energia prodotta dall'impianto alla sottostazione di trasformazione 30/132 kV prevista sul territorio del comune di Montalto di Castro sulla particella n.239 del foglio n.55.

Dalla sottostazione di trasformazione si sviluppa il cavidotto in alta tensione a 132 kV che percorre principalmente il tracciato della viabilità esistente fino a raggiungere la stazione elettrica in condivisione con altri produttori. Quest'ultima sarà collegata in antenna a 132 kV sulla sezione 132 kV della futura Stazione Elettrica (SE) della RTN a 380/132 kV da inserire in entra – esce sulla linea RTN esistente 380 kV "Montalto – Suvereto".

Completano il quadro delle opere da realizzare una serie di adeguamenti temporanei alle strade esistenti necessari a consentire il passaggio dei mezzi eccezionali di trasporto delle strutture costituenti gli aerogeneratori e per consentire l'accesso alla SE di Utenza.

In fase di realizzazione dell'impianto sarà necessario predisporre un'area logistica di cantiere con le funzioni di stoccaggio materiali e strutture, ricovero mezzi, disposizione dei baraccamenti necessari alle maestranze (fornitore degli aerogeneratori, costruttore delle opere civili ed elettriche) e alle figure deputate al controllo della realizzazione (Committenza dei lavori, Direzione Lavori, Coordinatore della Sicurezza in fase di esecuzione, Collaudatore).

Al termine dei lavori di costruzione dell'impianto, l'area di cantiere, le opere temporanee di adeguamento della viabilità e quelle funzionali alla realizzazione dell'impianto saranno rimosse ed i luoghi saranno ripristinati come ante operam.

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESSIB-TEN-SIA-TR-12 02/11/2022 02/11/2022 01 4 di 11
---	--	---	--

La presente relazione riporta la procedura operata per il calcolo della gittata massima di una pala e di un suo frammento lungo 10, 5, ed 1 m relativa un aerogeneratore con altezza al mozzo 119 m, diametro del rotore 162 m e potenza 7200 kW. Nel calcolo della gittata massima dell'intera pala ci si è posti nell'ipotesi di distacco della pala nel punto di serraggio sul mozzo, punto di maggiore sollecitazione, per evidente effetto di intaglio dovuto al collegamento. Nel caso di calcolo della gittata massima dei frammenti lunghi 10, 5 ed 1 m, il punto di distacco è misurato a partire dalla punta dalla pala.

Per il calcolo sono stati utilizzati modelli semplificati che assimilano il moto della pala e del frammento a quello irrotazionale di un corpo puntiforme avente massa e centro di gravità coincidenti con quelli dell'oggetto distaccato e assoggettato alle forze aerodinamiche agenti su di esso. Tale metodologia consente lo sviluppo di calcoli più agili garantendo ottimi margini di approssimazione ed assicura valutazioni ampiamente cautelative e, quindi, a vantaggio di sicurezza, in quanto le azioni trascurate indurrebbero comunque ulteriori dissipazioni e ridurrebbero i valori di gittata massima.

Il calcolo della gittata massima viene eseguito al fine di prevedere possibili problemi che una simile eventualità, per quanto improbabile, possa procurare a cose o persone.

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESSIB-TEN-SIA-TR-12 02/11/2022 02/11/2022 01 5 di 11
---	--	---	--

2 METODOLOGIA DI CALCOLO DELLA GITTATA

La valutazione della gittata massima corrispondente al distacco di un elemento del rotore di un aerogeneratore (l'intera pala o un frammento di differenti dimensioni) viene effettuato risolvendo il sistema di equazioni rappresentative del moto, nelle quali vengono espressi gli effetti dinamici indotti dalle forze agenti sul corpo stesso (forza peso, azione del vento, reazione di attrito dell'aria), adottando specifiche condizioni al contorno cautelative che permettono di valutare i risultati con adeguato margine di sicurezza.

Le condizioni al contorno considerate nel calcolo sono le seguenti:

- Densità dell'aria $1,13 \text{ kg/m}^3$ (valor minimo per il sito arrotondato per difetto in favore di sicurezza e calcolato all'altezza massima della pala alla temperatura di 35°);
- Velocità del vento 25 m/s , corrispondente alla massima velocità di rotazione ammessa prima che vengano automaticamente messe in stallo le pale;
- Velocità di rotazione della pala corrispondente al valore di velocità di rotazione del rotore massima consentita per il modello di aerogeneratore di progetto.

Tali valori sono rappresentativi di ipotesi cautelative in quanto corrispondenti a valori di condizioni al contorno che massimizzano la gittata.

Il sistema di riferimento adottato è riportato nella seguente figura:

- Asse X coincidente con la retta orizzontale passante per la base della torre e ortogonale all'asse di rotazione delle pale,
- Asse Y coincidente con la retta orizzontale passante per la base della torre, e parallelo all'asse di rotazione delle pale,
- Asse Z coincidente con l'asse della torre.

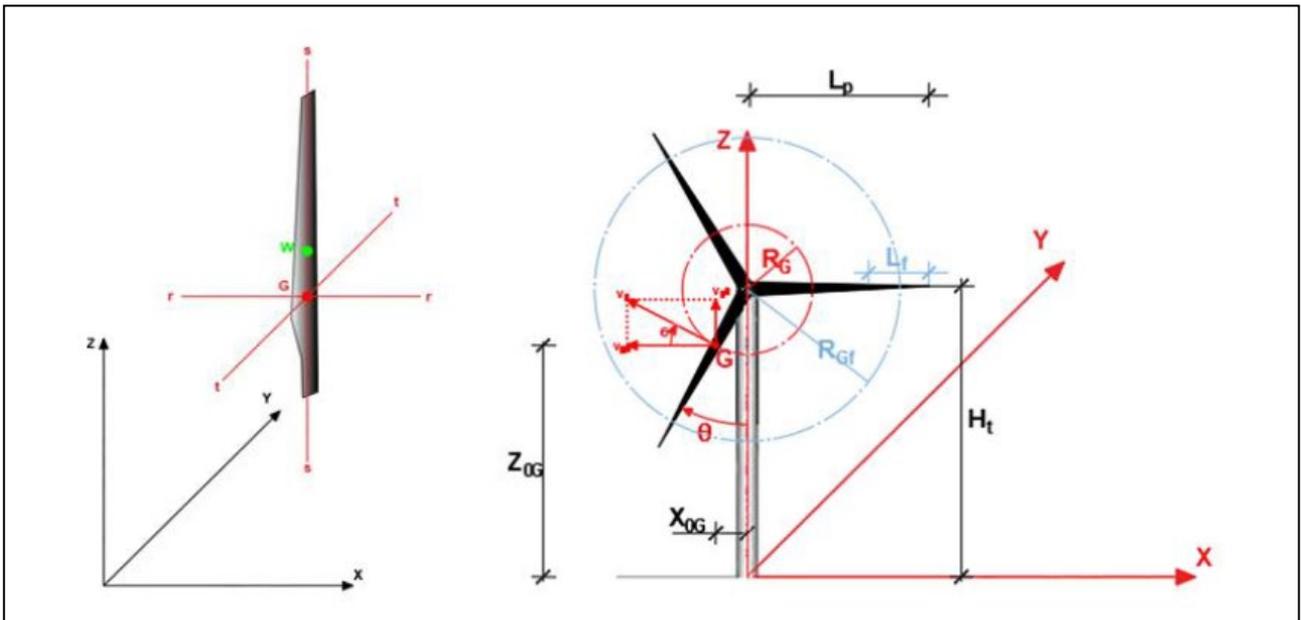


Figura 1: Schema del sistema di riferimento considerato

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice	IT-VESSIB-TEN-SIA-TR-12
		Data creazione	02/11/2022
		Data ultima modif.	02/11/2022
		Revisione	01
		Pagina	6 di 11

In condizioni di regime normale il vento agisce in direzione ortogonale al piano delle pale, secondo una direzione parallela all'asse Y e induce la rotazione del rotore nel piano XZ con velocità angolare costante ω . Le pale del rotore dunque ruotando descrivono una circonferenza di raggio R_P , mentre il baricentro G della singola pala descrive una circonferenza di raggio R_G , usualmente ritenuto pari a circa 1/3 di R_P (baricentro, ubicato a circa 1/3 della lunghezza della pala).

La pala non subisce rotazioni rispetto agli assi r-r, s-s, t-t.

In tali condizioni le caratteristiche geometriche e cinematiche del moto del baricentro di una specifica pala possono essere espresse in funzione dell'angolo ϑ , formato tra l'asse della torre e l'asse longitudinale della pala:

La posizione del baricentro G (X_{0G} , Y_{0G} , Z_{0G}):

$$X_{0G} = R_G \sin \theta ; \quad Y_{0G} = 0 ; \quad Z_{0G} = H_t - R_G \cos \theta \quad \text{con } R_G = \frac{1}{3} R_P$$

la velocità V_{0G} del baricentro G ha direzione ortogonale all'asse longitudinale della pala, in quanto tangente alla circonferenza di raggio R_G , verso coerente con quello di rotazione ω e componenti v_{0X} , v_{0Y} , v_{0Z} :

$$v_{0X} = -v_{0G} \sin \theta ; \quad v_{0Y} = 0 ; \quad v_{0Z} = v_{0G} \cos \theta \quad \text{con } v_{0G} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega}{60} R_G$$

Al variare della posizione angolare della pala, descritta dall'angolo ϑ , cambiano, quindi, le condizioni cinematiche e la posizione del baricentro.

In condizioni di distacco della pala o di un suo frammento, le relazioni precedentemente descritte e le relative grandezze fisiche che esse rappresentano corrispondono, quindi, alle condizioni di inizio distacco, coincidenti con l'origine dei tempi ($t=0$), mentre il successivo moto descritto dal frammento distaccato ($t>0$) richiede una trattazione più complessa nella quale viene considerata l'analisi tridimensionale del moto rotazionale di un corpo di dimensioni non trascurabili che si muove ruotando attorno al proprio baricentro rispetto ai tre assi ortogonali di riferimento (r-r, s-s, t-t) e traslando nelle direzioni degli assi X, Y, Z.

Nel caso della stima del valore della gittata massima, possono essere utilizzati modelli semplificati che assimilano il moto a quello irrotazionale di un corpo puntiforme avente massa e centro di gravità coincidenti con quelli dell'oggetto distaccato e assoggettato alle forze aerodinamiche agenti su di esso.

Tale metodologia consente lo sviluppo di calcoli più agili garantendo ottimi margini di approssimazione ed assicura valutazioni ampiamente cautelative e, quindi, a vantaggio di sicurezza, in quanto le azioni trascurate indurrebbero comunque ulteriori dissipazioni e ridurrebbero i valori di gittata massima.

Il modello di calcolo prevede che sul baricentro del frammento agiscano le seguenti forze:

- la forza peso F_g , che ha direzione lungo l'asse Z e verso negativo:
 $F_g = m \cdot g$ in cui m è la massa della pala e g è l'accelerazione di gravità
- la resistenza aerodinamica F_v , che ha direzione analoga a quella del vettore velocità v di traslazione della pala, ma verso contrario. Assumendo che la pala, o il frammento di essa, nel loro moto, ruotino progressivamente attorno al loro asse t-t, conservando sempre direzione ortogonale alla componente della velocità nel piano X-Z si può esprimere la resistenza aerodinamica nelle sue componenti principali, corrispondenti al moto traslatorio nel piano X-Z ed Y-Z:

$$F_{xz} = -\frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot S \cdot v_{xz}^2 ; \quad F_y = -\frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot S \cdot (w - v_y)^2$$

	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice	IT-VESSIB-TEN-SIA-TR-12
		Data creazione	02/11/2022
		Data ultima modif.	02/11/2022
		Revisione	01
		Pagina	7 di 11

In cui v_{xz} è ottenuta come somma delle componenti della velocità lungo X ed Y:

$$v_{xz} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad \text{con } \tan \beta = \frac{v_z}{v_x}$$

Avendo indicato con:

- C il coefficiente di resistenza aerodinamica dell'intera pala o del frammento
- ρ la densità dell'aria, che è funzione della temperatura e della quota sul livello del mare e si può assumere cautelativamente pari a $1,13 \text{ kg/m}^3$,
- S la superficie maestra della pala ortogonale alla direzione del moto,
- v_{xz} e v_y le componenti della velocità v di traslazione della pala rispettivamente nel piano xz, e lungo la direzione y,
- w la velocità del vento assunta pari a 25 m/s , corrispondente alla massima velocità prima che vengano automaticamente poste in stallo le pale,

β è l'angolo tra la direzione della velocità v_{xz} e la sua proiezione nella direzione parallela all'asse X. Avendo ipotizzato costanti i coefficienti C, ρ e S si possono esprimere le componenti della forza d'attrito lungo X e Z come:

$$F_x = F_{xz} \cdot \cos \beta \quad ; \quad F_z = F_{xz} \cdot \sin \beta$$

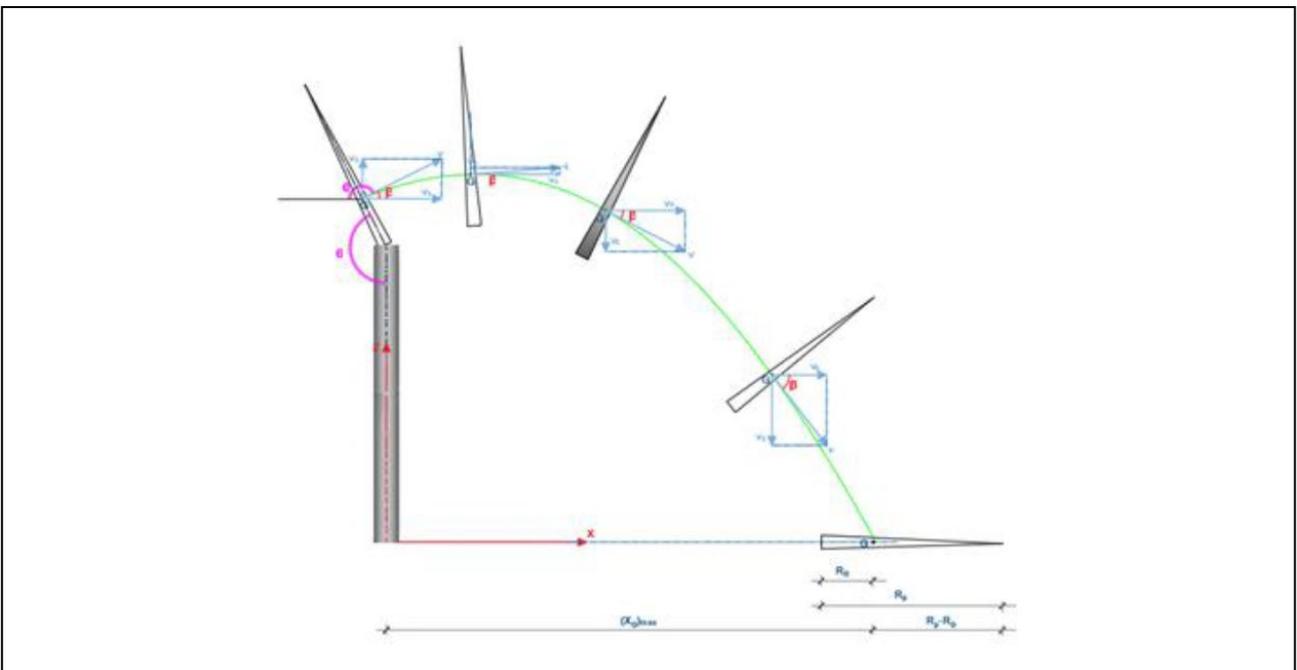


Figura 2: Schema di riferimento considerato

Quindi, applicando il secondo principio della dinamica è possibile scrivere, nel generico istante t , le equazioni di moto in ciascuna delle direzioni principali:

- Lungo la direzione X, sul corpo di massa m dotato di una certa velocità v_x agir  l'azione della resistenza dell'aria F_x (sempre di verso opposto alla direzione della velocità di traslazione) e quindi il corpo subisce un'accelerazione a_x :

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESSIB-TEN-SIA-TR-12 02/11/2022 02/11/2022 01 8 di 11
---	--	---	--

$$m \cdot a_x(t) = -F_{XZ}(t) \cdot \cos \beta(t)$$

- Lungo la direzione Y, sul corpo di massa m dotato di una certa velocità v_y agirà l'azione della resistenza dell'aria F_Y (sempre di verso opposto alla direzione della velocità di traslazione) e quindi il corpo subisce un'accelerazione a_y :

$$m \cdot a_y(t) = -F_y(t)$$

- Lungo la direzione Z, sul corpo di massa m dotato di una certa velocità v_z agiranno l'azione della resistenza dell'aria F_z (sempre di verso opposto alla direzione della velocità di traslazione) e l'azione della forza peso $-m \cdot g$; quindi, il corpo subisce un'accelerazione a_z :

$$m \cdot a_z(t) = -F_{XZ}(t) \cdot \sin \beta(t) - m \cdot g$$

Tali equazioni permettono di ricavare i valori delle accelerazioni a_x , a_y , a_z , nelle direzioni degli assi principali di riferimento X,Y, Z.

Conseguentemente le componenti della velocità v risultano espresse dalle relazioni:

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + a_x(t) \cdot \Delta t$$

$$v_y(t + \Delta t) = v_y(t) + a_y(t) \cdot \Delta t$$

$$v_z(t + \Delta t) = v_z(t) + a_z(t) \cdot \Delta t$$

e le componenti dello spostamento dalle relazioni:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v_x(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_x(t) \cdot \Delta t^2$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + v_y(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_y(t) \cdot \Delta t^2$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) + v_z(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_z(t) \cdot \Delta t^2$$

Queste equazioni descrivono il moto della pala o del frammento nel generico istante di tempo t e possono essere integrate a partire dall'istante di distacco assunto pari a zero ($t_0=0$) adottando un procedimento alle differenze finite con un passo di integrazione sufficientemente piccolo.

In tale modo si ricavano le coordinate (X_t , Y_t , Z_t) della traiettoria e le caratteristiche cinematiche del moto (v_{xt} , v_{yt} , v_{zt} , a_{xt} , a_{yt} , a_{zt}) in ogni istante e si valuta il tempo t_v (tempo di volo) per il quale il corpo giunge al suolo in corrispondenza del punto più lontano di coordinate (X_{max} , Y_{tv} , $Z_{tv}=0$).

Ricavate le coordinate del punto di atterraggio della pala o del frammento è necessario valutare la distanza vettoriale di detto punto dall'origine degli assi (0,0,0) coincidente con la base della torre, attraverso la relazione:

$$L_{tv} = \sqrt{x_{tv}^2 + y_{tv}^2}$$

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESSIB-TEN-SIA-TR-12 02/11/2022 02/11/2022 01 9 di 11
---	--	---	--

La gittata vettoriale si ottiene quindi sommando, al valore L_{tv} ricavato, la distanza tra l'estremità dell'elemento ed il suo baricentro:

$$Gittata\ vettoriale\ della\ pala = L_{tv} + R_p - R_{Gp}$$

$$Gittata\ vettoriale\ del\ frammento = L_{tv} + R_p - R_{Gf}$$

Indicando con il pedice p i termini riferiti alla pala e con il pedice f quelli riferiti al frammento.

Al variare della posizione assunta dalla pala (angolo ϑ) nell'istante del distacco ($t_0=0$) cambiano le condizioni iniziali (X_{0G} , Y_{0G} , Z_{0G}) e, con esse, tutti i parametri che definiscono la traiettoria seguita dalla pala stessa e, quindi, la distanza massima del punto di caduta dall'asse della torre stessa.

La stima della gittata vettoriale massima si ottiene ripetendo il calcolo per differenti angoli iniziali (ϑ) ed individuando i parametri relativi alle condizioni più sfavorevoli.

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice	IT-VESSIB-TEN-SIA-TR-12
		Data creazione	02/11/2022
		Data ultima modif.	02/11/2022
		Revisione	01
		Pagina	10 di 11

3 CALCOLO DELLA GITTATA PER L'AEROGENERATORE DI PROGETTO

Nel seguito si procederà all'implementazione del modello fisico sopra descritto al fine di calcolare la gittata massima dell'intera pala e di un frammento di pala per lo specifico modello di aerogeneratore previsto per l'installazione nel progetto del parco eolico: **Vestas V162 con altezza al mozzo pari a 119 m e potenza 7200 kW.**

I dati geometrici e cinematici sui quali è basato il calcolo sono dunque:

- Altezza del rotore dal livello del terreno: 119 m,
- Diametro del rotore: 162 m (lunghezza della pala 81 m),
- Velocità di rotazione: 12,1 giri/minuto.

È stata calcolata la gittata sia del frammento di pala di lunghezza 1, 5 e 10 m che della pala intera e per diversi valori dell'angolo ϑ compresi fra 0° e 180° .

I valori dell'angolo ϑ maggiori di 180° sono esclusi dal calcolo in quanto per tali condizioni, essendo la componente lungo Z della velocità iniziale del frammento orientata con verso il basso, si ha che in ogni caso i valori di gittata calcolati risulteranno inferiori a quelli ottenuti per le condizioni $0^\circ < \vartheta < 180^\circ$.

Tabella 1: Sintesi dei risultati ottenuti per i diversi casi considerati

	Pala intera	Frammento	Frammento	Frammento
Lunghezza [m]	81,10	1	5	10
Peso [kg]	27700	70	600	1400
Superficie effic. [mq]	173	1,1	8	20
Tempo di volo [s]	7,2	10	9,7	9,9
Gittata massima [m]	216,9	288,6	308,7	295,0

I valori dimensionali e di superficie e peso del profilo alare di progetto non disponibili come dati diretti e sono stati desunti da valutazioni sulle dimensioni e tecnologia strutturale.

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESSIB-TEN-SIA-TR-12 02/11/2022 02/11/2022 01 11 di 11
---	--	---	---

4 COMPATIBILITÀ DEL PROGETTO IN RELAZIONE AGLI ELEMENTI ANTROPICI PRESENTI

Come dimostrato nel capitolo precedente, la gittata massima dell'aerogeneratore di progetto è pari a circa 309 metri e si registra nell'ipotesi remota del distacco di un frammento di lunghezza pari a 1 m. Tutti gli aerogeneratori sono ubicati a distanze superiori ai valori ottenuti per la gittata massima rispetto alle strade principali (statali, regionali e provinciali) e ai recettori individuati nell'area circostante.

Il recettore più vicino, R16, dista circa 435 m dall'aerogeneratore T01. La viabilità principale più prossima agli aerogeneratori è la strada provinciale 4, che dista circa 520 m dalla T08. Per completezza si specifica la presenza della strada regionale 312 Castrense, che dista circa 680 m dalla torre T01. Entrambe le distanze che garantiscono il rispetto della gittata massima calcolata.

Si rimanda all'elaborato IT-VESSIB-TEN-SIA-DW-05 per la verifica grafica del rispetto della gittata rispetto ai recettori e alle strade statali e provinciali presenti.

5 CONCLUSIONI

Come illustrato, per il calcolo della gittata sono stati utilizzati modelli semplificati che assimilano il moto della pala e del frammento a quello irrotazionale di un corpo puntiforme avente massa e centro di gravità coincidenti con quelli dell'oggetto distaccato e assoggettato alle forze aerodinamiche agenti su di esso.

Tale metodologia consente lo sviluppo di calcoli più agili garantendo ottimi margini di approssimazione ed assicura valutazioni ampiamente cautelative e, quindi, a vantaggio di sicurezza, in quanto le azioni trascurate indurrebbero comunque ulteriori dissipazioni e ridurrebbero i valori di gittata massima.

Alla luce delle considerazioni esposte, è stato dimostrato che la distanza degli aerogeneratori di progetto dalle strade statali e provinciali e dai ricettori sensibili è più che adeguata rispetto alla gittata massima delle pale.