

REGIONE SARDEGNA
PROVINCE DI ORISTANO E NUORO
Suni(OR) - Sindia (NU) - Macomer (NU)

LOCALITA' "S'ena e Cheos ", "Tiruddone", "Ferralzos"

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO DI PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE - 7 AEROGENERATORI

Sezione SIA:
STUDIO IMPATTO AMBIENTALE

Titolo elaborato:
RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE

N. Elaborato: **SIA10.CG.01**

Scala: -

Proponente

ORTA ENERGY 9 Srl

*Largo Guido Donegani, 2
CAP 20121 Milano (MI)
P.Iva 11898400962*

Amministratore
Francesco DOLZANI

Progettazione



sede legale e operativa
San Martino Sannita (BN) Loc. Chianarile snc Area Industriale
sede operativa
Lucera (FG) via A. La Cava 114
P.IVA 01465940623
Azienda con sistema gestione qualità Certificato N. 50 100 11873



Progettista
Dott. Ing. Nicola Forte



Rev.	Data	Elaborazione	Approvazione	Emissione	DESCRIZIONE
00	LUGLIO 2023	MMG sigla	PR sigla	NF sigla	Emissione progetto definitivo
Nome File sorgente		ES.SUN01.SIA10.CG.01.R00.doc	Nome file stampa	ES.SUN01.SIA10.CG.01.R00.pdf	Formato di stampa A4

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.SIA10.CG.01 08/08/2023 08/08/2023 00 2 di 13
---	--	---	---

INDICE

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.....	13

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.SIA10.CG.01 08/08/2023 08/08/2023 00 3 di 13
---	--	---	---

1 INTRODUZIONE

Il progetto descritto nella presente relazione riguarda la realizzazione di un impianto eolico costituito da 7 aerogeneratori della potenza di 6 MW ciascuno, per una potenza di 42 MW, integrato con un sistema di accumulo con batterie agli ioni da 20 MW, per una potenza complessiva in immissione di 62 MW da installare nel comune di Suni (OR) e Sindia (NU) alle località "S'ena e Cheos", "Tiruddone" e "Ferralzos", con opere di connessione alla rete di trasmissione nazionale ricadenti nel comune Macomer (NU) alla località "Mura de Putzu". Proponente dell'iniziativa è la società Orta Energy 9 srl.

Il sito di installazione degli aerogeneratori è ubicato tra i centri abitati di Suni e Sindia, dai quali gli aerogeneratori più prossimi distano rispettivamente 4,5 km e 2,5 km.

Gli aerogeneratori sono collegati tra loro mediante un cavidotto in media tensione interrato denominato "cavidotto interno" che sarà posato quasi totalmente al di sotto di viabilità esistente e che giunge fino alla cabina di raccolta, prevista nel comune di Sindia alla località "Piena Porcalzos" nei pressi della strada comunale Miali Spina.

Dalla cabina di raccolta parte il tracciato del cavidotto interrato in media tensione "esterno", che corre su strada esistente e che, dopo circa 19 km, raggiunge la stazione elettrica di trasformazione 30/150 kV di progetto (in breve SE di utenza).

La SE di utenza, infine, è collegata in antenna a 150 kV sulla sezione a 150 kV della futura Stazione Elettrica (SE) di trasformazione 380/150 kV della RTN da inserire in entra-esce alla linea a 380 kV "Ittiri - Selargius".

All'interno della stazione di utenza è prevista l'installazione di un sistema di accumulo di energia denominato BESS - Battery Energy Storage System, basato su tecnologia elettrochimica a ioni di litio, comprendente gli elementi di accumulo, il sistema di conversione DC/AC e il sistema di elevazione con trasformatore e quadro di interfaccia. Il sistema di accumulo è dimensionato per 20 MW con soluzione containerizzata, composto sostanzialmente da:

- 16 Container metallici Batterie HC ISO con relativi sistemi di comando e controllo;
- 8 Container metallici PCS HC ISO per le unità inverter completi di quadri servizi ausiliari e relativi pannelli di controllo e trasformazione BT/MT.

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.

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).

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.SIA10.CG.01 08/08/2023 08/08/2023 00 4 di 13
---	--	---	---

Al termine dei lavori di costruzione dell'impianto, le aree 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.

La presente relazione riporta la procedura di prima approssimazione seguita per il calcolo della gittata massima di una pala di un aerogeneratore del tipo VESTAS V-162 con altezza al mozzo 125 m e potenza 6 MW.

Nel calcolo 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. Questo calcolo viene eseguito al fine di prevedere possibili problemi che una simile eventualità, per quanto improbabile, possa procurare a cose o persone. È stato inoltre eseguito il calcolo nell'ipotesi di distacco di frammenti lunghi 1 m, 5 m e 10 m misurati a partire dalla punta dalla pala.

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.SIA10.CG.01 08/08/2023 08/08/2023 00 5 di 13
---	--	---	---

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 $1,09 \text{ kg/m}^3$ (valor minimo per il sito arrotondato per difetto in favore di sicurezza e calcolato all'altezza massima della pala più alta 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.

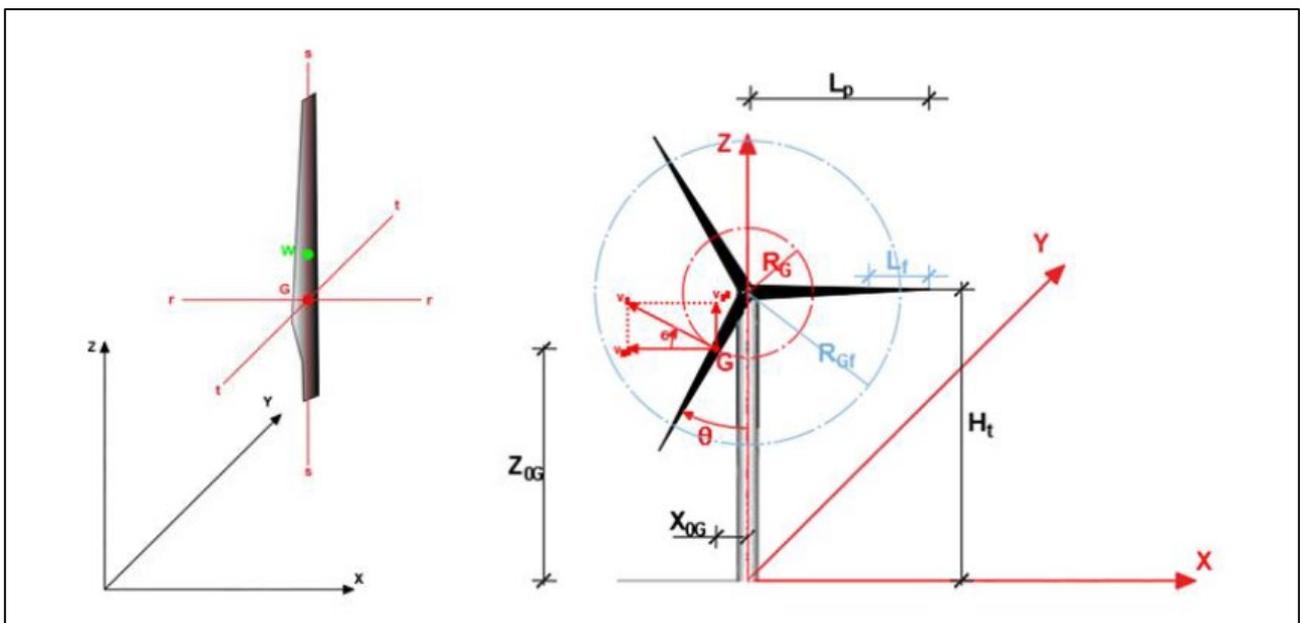


Figura 1: Schema del sistema di riferimento considerato

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.SIA10.CG.01 08/08/2023 08/08/2023 00 6 di 13
---	--	---	---

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.

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.SIA10.CG.01 08/08/2023 08/08/2023 00 7 di 13
---	--	---	---

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:

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

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

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

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 1,09 kg/m³,
- 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:

$$F_X = F_{XZ} \cdot \cos \beta \quad ; \quad F_Z = F_{XZ} \cdot \sin \beta$$

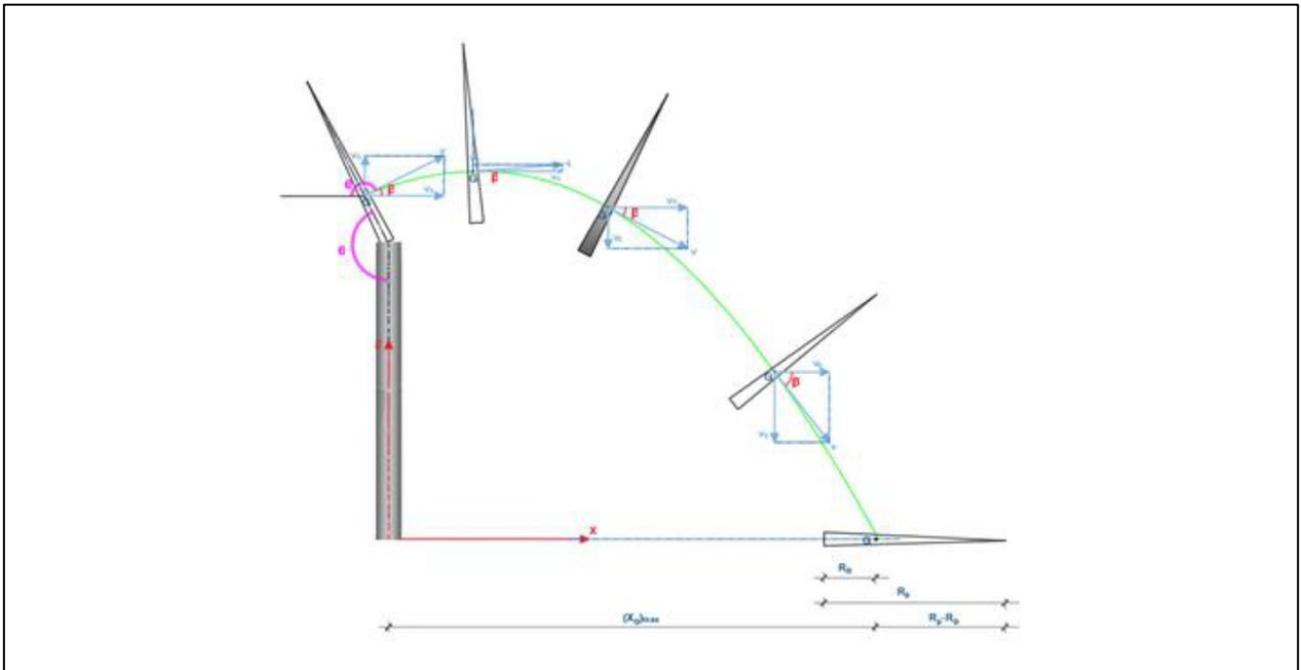


Figura 2

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 agirà 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 :

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

- 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 :

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

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.SIA10.CG.01 08/08/2023 08/08/2023 00 9 di 13
---	--	---	---

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:

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

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

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

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

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 Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.SIA10.CG.01 08/08/2023 08/08/2023 00 10 di 13
---	--	---	--

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 di diverse lunghezze per lo specifico modello di aerogeneratore previsto per l'installazione nel progetto del parco eolico: **Vestas V162 con altezza al mozzo pari a 125 m e potenza 6000 kW.**

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

- Altezza del rotore dal livello del terreno: 125 m,
- Diametro del rotore: 162 m (lunghezza della pala 79,35 m),
- Velocità di rotazione: 12,1 giri/minuto.

Sono stati calcolati sia i valori della gittata per diverse lunghezze del frammento di pala (1 m, 5 m e 10 m) che della pala intera, 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 $0^\circ < \vartheta < 180^\circ$.

Nella tabella che segue si riportano sinteticamente i risultati ottenuti.

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

	Pala intera	Frammento	Frammento	Frammento
Lunghezza [m]	79,35	10	5	1
Peso [kg]	21700	421	105	46
Superficie effic. [mq]	332	6,4	1,6	0,7
Tempo di volo [s]	8,3	9,8	10,1	9,9
Gittata massima [m]	202,8	294,1	297,0	300,1

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	ES.SUN01.SIA10.CG.01 08/08/2023 08/08/2023 00 11 di 13
---	--	---	--

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 **300,1 metri** e si registra nell'ipotesi di distacco di un frammento lungo 1 m.

Tutti gli aerogeneratori sono ubicati a distanze superiori ai valori ottenuti per la gittata massima rispetto alle strade principali (statali, regionali, provinciali) ed ai recettori individuati nell'area circostante.

Il recettore più vicino, D43, dista circa 307,5 m dall'aerogeneratore T04.

La viabilità principale più prossima agli aerogeneratori è la Strada Statale SS129 bis, la quale dista circa 842 m dalla turbina T04, distanza che garantisce ampiamente il rispetto della gittata massima calcolata.

Si rimanda all'elaborato ES.SUN01.SIA10.CG.01.R00 per la verifica grafica del rispetto della gittata rispetto ai recettori e alle strade statali e provinciali presenti.

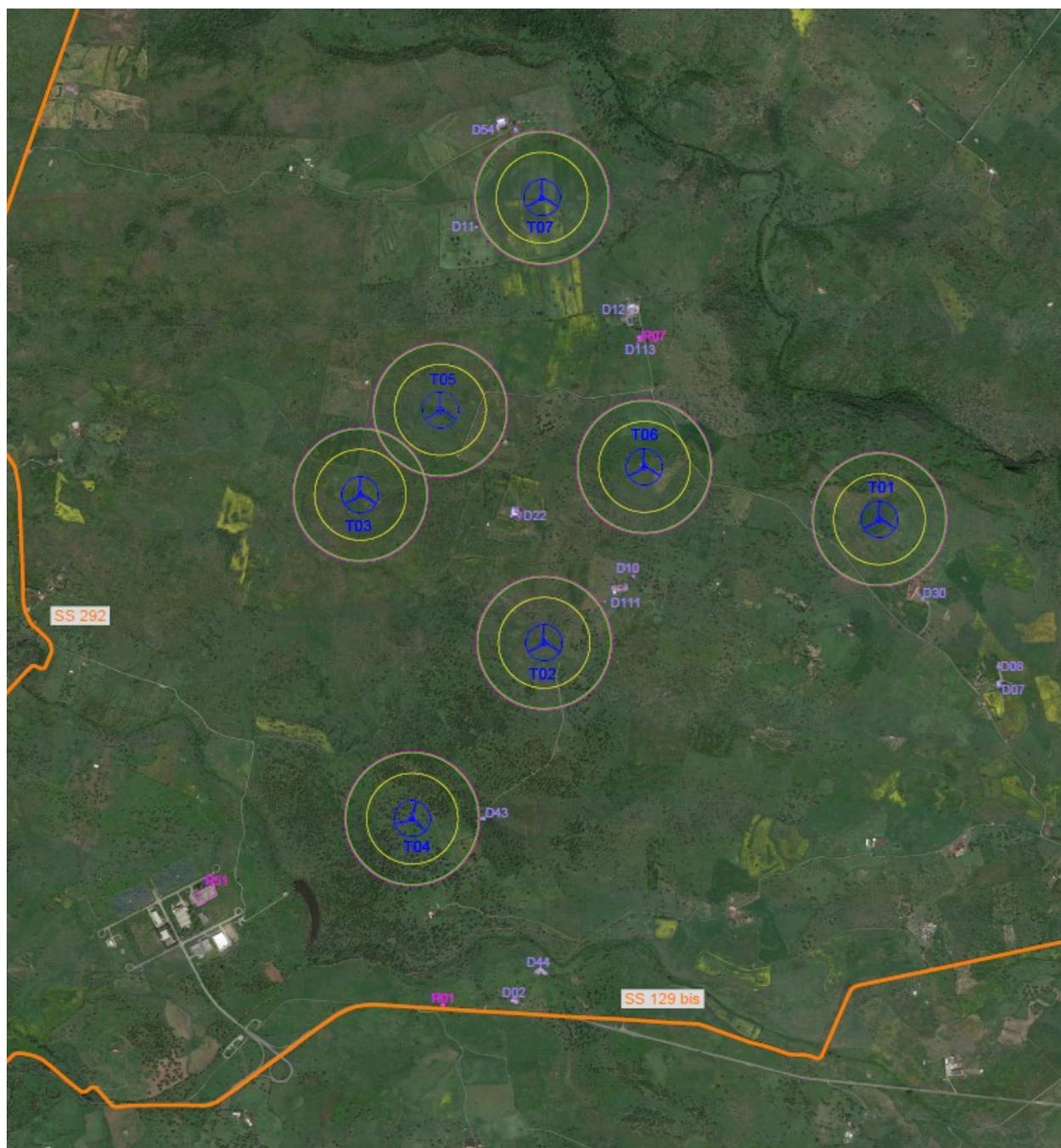


Figura 3: Indicazione dei punti di caduta massima in caso di rottura con fabbricati recettori su rilievo ortografico.

 TENPROJECT	RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.SIA10.CG.01 08/08/2023 08/08/2023 00 13 di 13
---	--	---	--

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.