

Levant Wind S.r.l.

**Parco Eolico "Levant" sito nei comuni di:
Buseto Palizzolo, Erice e Valderice**

RELAZIONE SULLA GITTATA

Giugno 2022



Committente:

Levant Wind S.r.l.

Levant Wind S.r.l.
Via Sardegna, 40
00187 Roma
P.IVA/C.F. 1618113100

Titolo del Progetto:

Parco Eolico "Levant" sito nei Comuni di: Buseto Palizzolo, Erice e Valderice

Documento:

RELAZIONE SULLA GITTATA

N° Documento:

IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11

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



Consulente per la progettazione
Dott. Ing. Gaetano PUPILLA
Dott. Ing. Salvatore PRIOLO

Rev	Data Revisione	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
00	Giugno 2022	Richiesta AU	MMG - MC	PM - MO	NF

 TENPROJECT	CALCOLO SULLA GITTATA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11 29/06/2022 30/06/2022 02 2 di 15
---	------------------------------	---	--

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
2	METODOLOGIA DI CALCOLO DELLA GITTATA	4
4	CALCOLO DELLA GITTATA PER L'AEROGENERATORE DI PROGETTO	9
4.1	Caso di distacco del frammento di 1 metro: Calcoli e risultato.....	10
4.4	Caso di distacco della intera pala: Calcoli e risultato	13
5	COMPATIBILITÀ DEL PROGETTO IN RELAZIONE AGLI ELEMENTI ANTROPICI PRESENTI.....	14
6	CONCLUSIONI.....	15

 TENPROJECT	CALCOLO SULLA GITTATA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11 29/06/2022 30/06/2022 02 3 di 15
---	------------------------------	---	--

1 INTRODUZIONE

Il progetto descritto nella presente relazione riguarda la realizzazione di un impianto eolico costituito da undici aerogeneratori della potenza unitaria di 6,00 MW modello Vestas-V162, per una potenza complessiva di impianto pari a 66,00 MW. L'installazione insisterà nei comuni di Buseto Palizzolo (TP), Erice (TP) e Valderice (TP) alle località "Menta", "Carrubazza", "Timpone Tangi", con opere di connessione ricadenti sugli stessi territori comunali.

Proponente dell'iniziativa è la società LEVANT WIND s.r.l. con sede in Via Sardegna 40, 00187 Roma (RM).

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 6000 kW. 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	CALCOLO SULLA GITTATA	Codice	IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11
		Data creazione	29/06/2022
		Data ultima modif.	30/06/2022
		Revisione	02
		Pagina	4 di 15

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 $1,1 \text{ kg/m}^3$ (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.

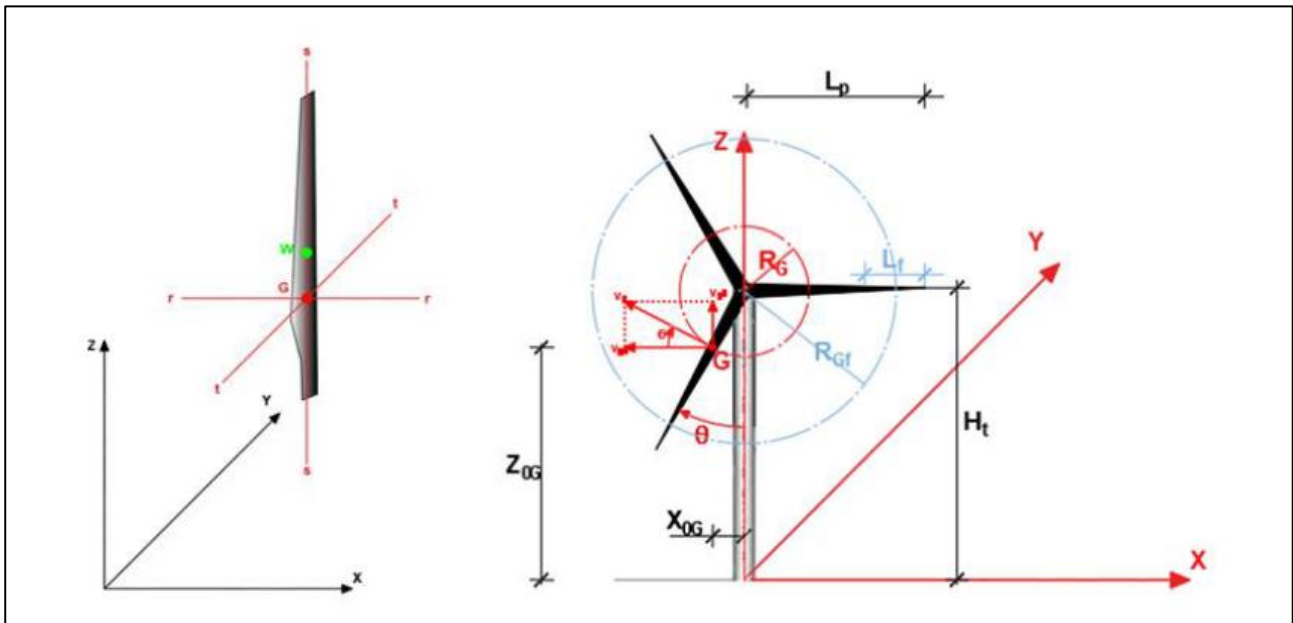


Figura 1: Schema del sistema di riferimento considerato

	CALCOLO SULLA GITTATA	Codice	IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11
		Data creazione	29/06/2022
		Data ultima modif.	30/06/2022
		Revisione	02
		Pagina	5 di 15

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:

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



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 $1,1 \text{ kg/m}^3$,
- 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:

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

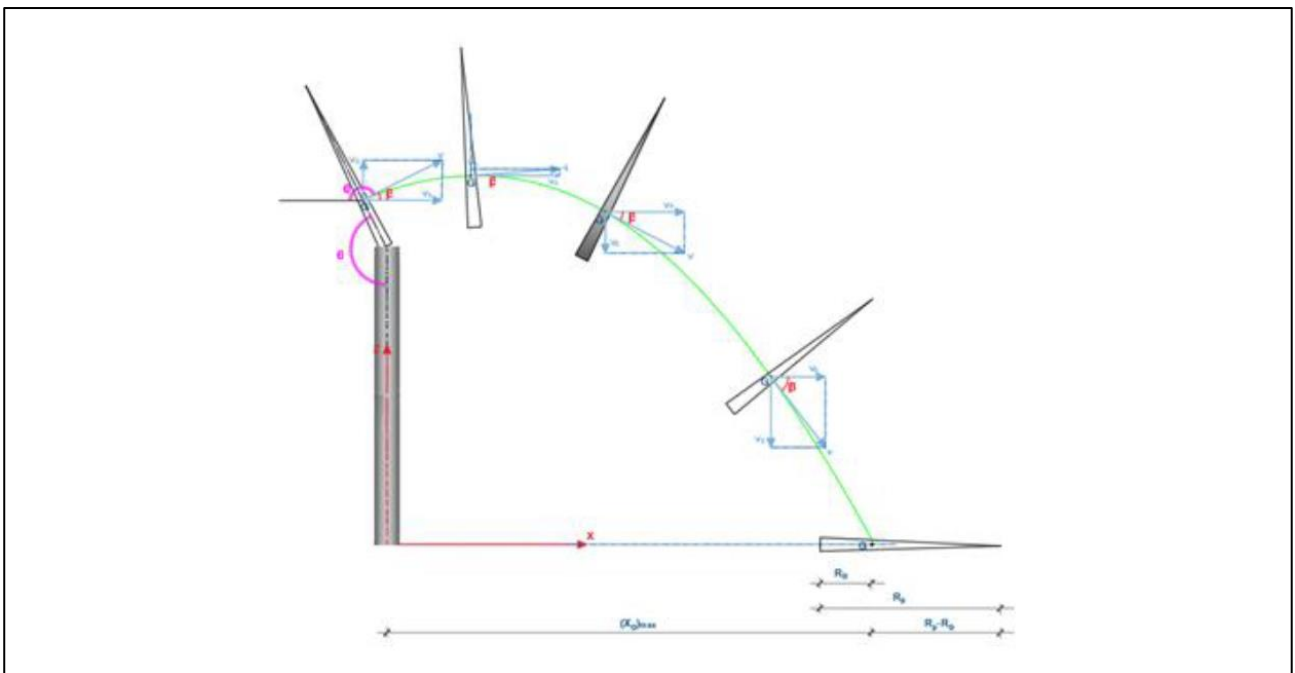


Figura 2

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 :

 TENPROJECT	CALCOLO SULLA GITTATA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11 29/06/2022 30/06/2022 02 7 di 15
---	------------------------------	---	--

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

- 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:

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

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

 TENPROJECT	CALCOLO SULLA GITTATA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11 29/06/2022 30/06/2022 02 8 di 15
---	------------------------------	---	--

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

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

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	CALCOLO SULLA GITTATA	Codice	IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11
		Data creazione	29/06/2022
		Data ultima modif.	30/06/2022
		Revisione	02
		Pagina	9 di 15

4 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 81 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.

	Pala intera	Frammento	Frammento	Frammento
Lunghezza [m]	81,10	1	5	10
Peso [kg]	27700	70	600	1400
Superficie eff. [mq]	173	1,1	8	20
Tempo di volo [s]	6,3	8,97	8,60	8,60
Gittata massima [m]	209,2	275,9	293,7	281,1

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

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	CALCOLO SULLA GITTATA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11 29/06/2022 30/06/2022 02 10 di 15
---	------------------------------	---	---

4.1 Caso di distacco del frammento di 1 metro: Calcoli e risultato

Le caratteristiche dimensionali del frammento sono:

- Lunghezza del frammento: 1 m,
- Peso del frammento: 70 kg,
- Superficie maestra del frammento (ortogonale alla direzione del moto): 1,1 m²,
- Coefficiente di resistenza aerodinamica pari a 0,82.

Le condizioni ambientali considerate sono le seguenti:

- Densità dell'aria assunta cautelativamente pari a 1,1 kg/m³.

Il passo di integrazione utilizzato per la risoluzione delle equazioni del modello fisico è posto pari 0,001 s, valore ritenuto valido al fine di ottenere un errore di calcolo sufficientemente contenuto.

GITTATA MASSIMA [m]
275,9
ANGOLO GITTATA MASSIMA [°]
44
TEMPO DI VOLO [s]
8,97

Tabella 2: Risultati ottenuti per il frammento di 1 m

 TENPROJECT	CALCOLO SULLA GITTATA	Codice	IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11
		Data creazione	29/06/2022
		Data ultima modif.	30/06/2022
		Revisione	02
		Pagina	11 di 15

4.2 Caso di distacco del frammento di 5 metri: Calcoli e risultato

Le caratteristiche dimensionali del frammento sono:

- Lunghezza del frammento: 5 m,
- Peso del frammento: 600 kg,
- Superficie maestra del frammento (ortogonale alla direzione del moto): 8,0 m²,
- Coefficiente di resistenza aerodinamica pari a 0,82.

Le condizioni ambientali considerate sono le seguenti:

- Densità dell'aria assunta cautelativamente pari a 1,1 kg/m³.

Il passo di integrazione utilizzato per la risoluzione delle equazioni del modello fisico è posto pari 0,001 s, valore ritenuto valido al fine di ottenere un errore di calcolo sufficientemente contenuto.

GITTATA MASSIMA [m]
293,7
ANGOLO GITTATA MASSIMA [°]
41
TEMPO DI VOLO [s]
8,6

Tabella 3: Risultati ottenuti per il frammento di 5 m

 TENPROJECT	CALCOLO SULLA GITTATA	Codice	IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11
		Data creazione	29/06/2022
		Data ultima modif.	30/06/2022
		Revisione	02
		Pagina	12 di 15

4.3 Caso di distacco del frammento di 10 metri: Calcoli e risultato

Le caratteristiche dimensionali del frammento sono:

- Lunghezza del frammento: 10 m,
- Peso del frammento: 1400 kg,
- Superficie maestra del frammento (ortogonale alla direzione del moto): 20,0 m²,
- Coefficiente di resistenza aerodinamica pari a 0,82.

Le condizioni ambientali considerate sono le seguenti:

- Densità dell'aria assunta cautelativamente pari a 1,1 kg/m³.

Il passo di integrazione utilizzato per la risoluzione delle equazioni del modello fisico è posto pari 0,001 s, valore ritenuto valido al fine di ottenere un errore di calcolo sufficientemente contenuto.

GITTATA MASSIMA [m]
281,1
ANGOLO GITTATA MASSIMA [°]
43
TEMPO DI VOLO [s]
8,6

Tabella 4: Risultati ottenuti per il frammento di 10 m

 TENPROJECT	CALCOLO SULLA GITTATA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11 29/06/2022 30/06/2022 02 13 di 15
---	------------------------------	---	---

4.4 Caso di distacco della intera pala: Calcoli e risultato

Le caratteristiche dimensionali dell'intera pala sono:

- Lunghezza del frammento: 81,10 m,
- Peso della pala: 27700 kg,
- Superficie maestra del frammento (ortogonale alla direzione del moto): 173,0 m²,
- Coefficiente di resistenza aerodinamica pari a 1,0.

Le condizioni ambientali considerate sono le seguenti:

- Densità dell'aria assunta cautelativamente pari a 1,1 kg/m³.

Il passo di integrazione utilizzato per la risoluzione delle equazioni del modello fisico è posto pari 0,001 s, valore ritenuto valido al fine di ottenere un errore di calcolo sufficientemente contenuto.

GITTATA MASSIMA [m]
209,2
ANGOLO GITTATA MASSIMA [°]
35
TEMPO DI VOLO [s]
6,3

Tabella 5: Risultati ottenuti per il distacco della intera pala



5 COMPATIBILITÀ DEL PROGETTO IN RELAZIONE AGLI ELEMENTI ANTROPICI PRESENTI

Come dimostrato nel capitolo precedente, la gittata massima dell'aerogeneratore di progetto è pari a **293,7 metri** e si registra nell'ipotesi di distacco di un frammento lungo 5 m.

Tutti gli aerogeneratori sono ubicati a distanze superiori ai valori ottenuti rispetto alle strade principali e ai recettori individuati nell'area, così come si rileva dall'immagine a seguire e dalla tavola IT-VESLVT-TEN-SIA-DW-10 allegata.

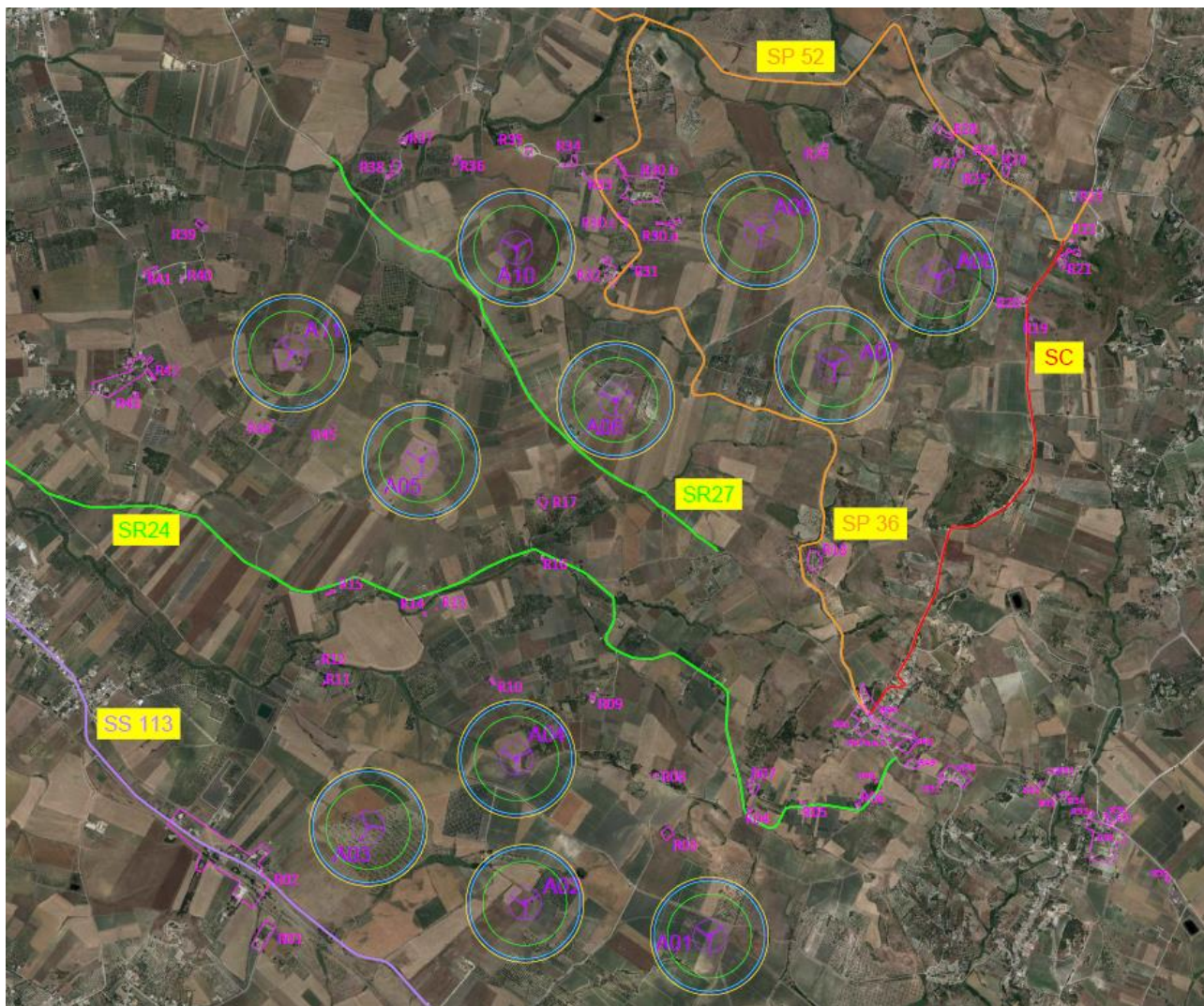


Figura 3: Distanze minime degli aerogeneratori dalle strade e dai recettori

 TENPROJECT	CALCOLO SULLA GITTATA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	IT-VESLVT-TEN-SIA-TR-11 29/06/2022 30/06/2022 02 15 di 15
---	------------------------------	---	---

6 CONCLUSIONI

Alla luce delle considerazioni sopra esposte, è stato dimostrato che la distanza degli aerogeneratori di progetto dalle strade e dai ricettori sensibili è più che adeguata rispetto alla gittata di una pala intera o di un frammento della stessa.