

COMMITTENTE



GRV WIND SHARDANA S.R.L.
Via Durini, 9 Tel. +39.02.50043159
20122 Milano PEC: grwindshardana@legalmail.it

PROGETTISTI



INSE S.r.l.
Viale Michelangelo,71 Tel. 081.579.7998
80129 Napoli Mail: tecnico@inse srl.it

Amm. Francesco Di Maso
Ing. Nicola Galdiero
Ing. Pasquale Esposito

Collaboratori:
Dott. Geol. V. E. Iervolino Arch. C. Gaudiero
Dott. F. Mascia Ing. F. Quarto
Dott. M. Medda Ing. R. D'Onofrio
Ing. A. Bartolazzi Ing. R. M. De Lucia
Arch. R. Alfano Geom. A. Bove



REGIONE SARDEGNA



PROVINCIA DI ORISTANO



PROVINCIA DEL SUD SARDEGNA



COMUNE DI USELLUS



COMUNE DI ASSOLO



COMUNE DI VILLA SANT'ANTONIO

PROGETTO

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO COMPOSTO DA 10 AEROGENERATORI DA 4.5 MW, PER UNA POTENZA COMPLESSIVA DI 45 MW SITO NEI COMUNI DI USELLUS (OR), VILLA SANT'ANTONIO (OR) E ASSOLO (OR) CON OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI USELLUS (OR), VILLA SANT'ANTONIO (OR), ASSOLO (OR), ALBAGIARA (OR), SENIS (OR), NURECI (OR) E GENONI (SU)

ELABORATO

Titolo:

**STUDIO SULLA GITTATA
DEGLI ELEMENTI ROTANTI**

Tav: / Doc:

SI 12

Codice elaborato:

AS311-SI12-R

Scala / Formato:

-:- / A4

00

DICEMBRE 2023

PRIMA EMISSIONE

INSE Srl

INSE Srl

GRV WIND SHARDANA Srl

REV.

DATA

DESCRIZIONE

ELABORAZIONE

VERIFICA

APPROVAZIONE

Sommario

1	PREMESSA.....	2
1.1	DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO.....	2
2	STUDIO DEL MOTO DEL PROIETTILE: DISTACCO DELL'INTERA PALA.....	4
2.1	IPOSTESI DI CALCOLO	5
2.2	EQUAZIONI DELLA CINEMATICA.....	6
2.3	VELOCITA' PERIFERICA.....	7
2.4	GITTATA PALA INTERA	8
2.5	GITTATA FRAMMENTI.....	9
2.6	ANALISI SUI RICETTORI	11
3	PROBABILITA' DI ACCADIMENTO.....	16
4	CONCLUSIONI	17

GRV Wind Shardana Srl 	STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	Cod. AS311-SIA12-R	
		Data Dicembre 2023	Rev. 00

1 PREMESSA

La società GRV Wind Shardana Srl è proponente di un progetto di un impianto di produzione di energia rinnovabile da fonte eolica ubicato nei Comuni di Usellus, Villa Sant'Antonio e Assolo in provincia di Oristano con annesse opere di connessione nei Comuni di Usellus, Villa Sant'Antonio, Assolo, Albagiara, Senis, Nureci e Genoni in provincia del sud Sardegna.

L'ipotesi progettuale prevede l'installazione di n.10 aerogeneratori della potenza nominale di 4,5 MW per una potenza complessiva di impianto pari a 45 MW. Gli aerogeneratori saranno collegati tra loro attraverso cavidotti interrati a 30 kV, che collegheranno il parco eolico ad una cabina utente 30 kV di smistamento. I cavi collegheranno il parco alla SE Utente 30/150 kV di condivisione. La società Terna ha rilasciato alla GRV Wind Shardana Srl la "Soluzione Tecnica Minima Generale" n. 202200313 del 09/03/2023 indicando le modalità di connessione che, al fine di razionalizzare l'utilizzo delle opere di rete per la connessione, prevede la condivisione dello stallo AT nel futuro stallo 150 kV di una nuova stazione RTN a 150 kV in entra-esce alle linee RTN a 150 kV "Taloro-Villasor" e "Taloro-Tuili", previo nuovo elettrodotto tra la suddetta SE e la Cabina Primaria Isili.

Il progetto è assoggettato a Valutazione di Impatto Ambientale di competenza Ministeriale, poiché la potenza totale dell'impianto è maggiore di 30 MW.

L'obiettivo della presente relazione è la determinazione della gittata massima della pala e di alcuni suoi frammenti, al fine di analizzare impatti su possibili recettori effettuando un'analisi cautelativa che consenta di operare a vantaggio di sicurezza.

1.1 DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO

Il parco eolico e le relative opere di connessione sono localizzati nella provincia di Oristano. In particolare, gli aerogeneratori, che sono gli unici elementi di progetto esaminati nella presente relazione, ricadono nei territori comunali di Usellus, Villa Sant'Antonio e Assolo:

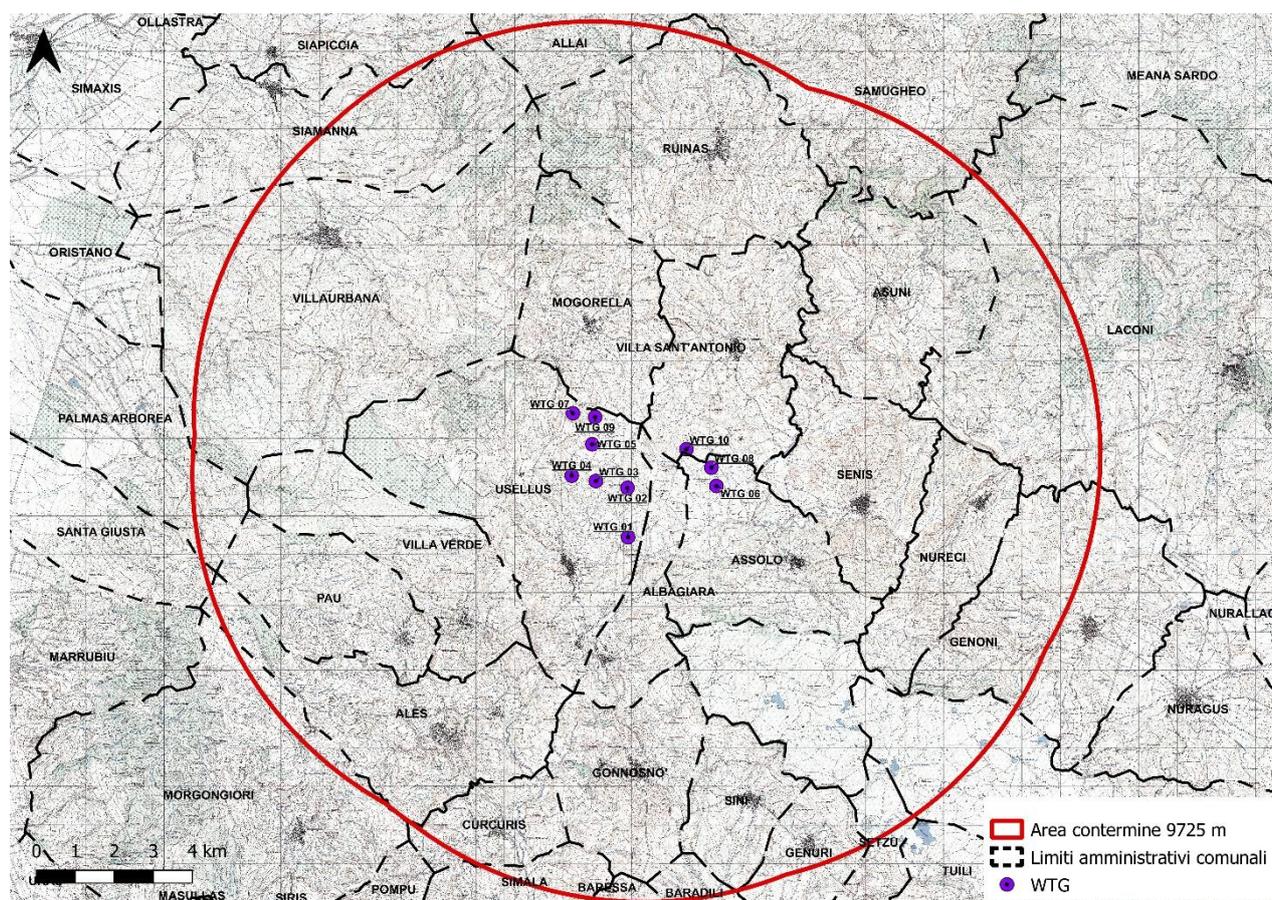


Figura 1: inquadratura territoriale su IGM dell'area contermine

L'area vasta, che è individuata su cartografia come l'involuppo delle distanze dagli aerogeneratori di ampiezza pari a 50 volte l'altezza al tip, è ampia 9,7 km e comprende invece altri Comuni della provincia di Oristano, come mostra la Figura 1.

L'aerogeneratore scelto in fase progettuale è il Vestas V163 da 4,5 MW, le cui caratteristiche geometriche e coordinate geografiche sono di seguito riportate:

ID WTG	Coordinate WGS 84 UTM 32		Coordinate Geografiche WGS84		Quote e misure				
	Long. EST (m)	Long. NORD (m)	Latitudine	Longitudine	Altitudine (m s.l.m.)	Modello WTG	Altezza mozzo (m)	Altezza TIP (m)	Altezza TIP (m s.l.m.)
WTG 01	488830	4407252	39°48'54.62"N	8°52'10.17"E	233	Vestas 4.5 MW - 163	113	194,5	427,5
WTG 02	488815	4408527	39°49'36.00"N	8°52'9.48"E	270	Vestas 4.5 MW - 163	113	194,5	464,5
WTG 03	488007	4408702	39°49'41.64"N	8°51'35.45"E	276	Vestas 4.5 MW - 163	113	194,5	470,5
WTG 04	487385	4408840	39°49'46.07"N	8°51'9.29"E	297	Vestas 4.5 MW - 163	113	194,5	491,5
WTG 05	487912	4409654	39°50'12.51"N	8°51'31.39"E	281	Vestas 4.5 MW - 163	113	194,5	475,5
WTG 06	491097	4408574	39°49'37.60"N	8°53'45.46"E	207	Vestas 4.5 MW - 163	113	194,5	401,5
WTG 07	487415	4410455	39°50'38.45"N	8°51'10.44"E	367	Vestas 4.5 MW - 163	113	194,5	561,5
WTG 08	490966	4409049	39°49'53.01"N	8°53'39.93"E	218	Vestas 4.5 MW - 163	113	194,5	412,5
WTG 09	487985	4410359	39°50'35.37"N	8°51'34.44"E	290	Vestas 4.5 MW - 163	113	194,5	484,5
WTG 10	490327	4409525	39°50'8.43"N	8°53'13.04"E	230	Vestas 4.5 MW - 163	113	194,5	424,5

Tabella 1: caratteristiche degli aerogeneratori

GRV Wind Shardana Srl 	STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	Cod. AS311-SIA12-R	
		Data Dicembre 2023	Rev. 00

2 STUDIO DEL MOTO DEL PROIETTILE: DISTACCO DELL'INTERA PALA

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala o un frammento della stessa) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse.

Tuttavia, al fine della sicurezza, la stima della gittata massima di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico. Le pale dei rotori 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 sino a quasi ad annullare 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 (seppure gravemente danneggiato), 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.

Tutte le pale oggi in commercio sono, inoltre, protette dalla fulminazione diretta in accordo alla norma IEC 61400 – 24 – livello I. Considerate le caratteristiche meccaniche e costruttive della pala, si può pertanto ritenere che ha senso effettuare esclusivamente un calcolo di gittata della pala intera in quanto esiste un punto di discontinuità, l'attacco bullonato che unisce la pala al mozzo, ed esiste un'ipotesi, seppur remota, sulla possibilità di cedimento di tale attacco.

Tuttavia, per operare in condizioni di maggiore sicurezza, saranno considerati anche le rotture di alcuni frammenti della pala.

I modelli teorici che meglio possono caratterizzare il moto nello spazio dell'intera pala possono essere ricondotti ai casi seguenti:

- Caso 1 Moto del proiettile con minore resistenza aerodinamica. Calcolo della gittata massima, in assenza di moto rotazionale intorno ad un asse qualsiasi, con ala complanare al rotore;
- Caso 2 Moto del proiettile con maggiore resistenza aerodinamica. Calcolo della gittata massima, sempre in assenza di moto rotazionale, intorno ad un asse qualsiasi, con traiettoria complanare al rotore ed ala ortogonale rispetto al piano del rotore;
- Caso 3 Calcolo della gittata massima in presenza di moti di rotazione intorno a ciascuno dei tre assi principali del frammento stesso. In caso di rottura, infatti, per il principio di conservazione del momento angolare, il generico spezzone di pala tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano e, a causa delle diverse pressioni cinetiche esercitate dal vento, tende anche a ruotare intorno a ciascuno dei due assi principali appartenenti al proprio piano.

Le condizioni prese in considerazione nel terzo caso, permettono senza dubbio un calcolo più preciso e maggiormente corrispondente al reale moto di una pala staccatasi dal rotore per cause accidentali e forniscono, sperimentalmente, un valore di gittata di circa il 20% in meno di quella fornita dal primo caso. Come già accennato precedentemente, la risoluzione del terzo caso è però più complessa e richiede la conoscenza di alcune caratteristiche degli aerogeneratori, non sempre fornite dai produttori, poiché oggetto di brevetto. Pertanto, si è deciso di utilizzare il primo caso, di facile soluzione e che fornisce un risultato maggiorato di circa il 20%, garantendo così un ulteriore margine di sicurezza.

Quanto appena detto è stato confermato anche dalla casa produttrice di aerogeneratori Vestas attraverso il Technical Report - Rev.8 - 23/12/2011 dal nome "Calcolo della traiettoria di una pala eolica i condizioni nominali di funzionamento". Nello studio citato, la Vestas ha infatti determinato la distanza che la pala di un aerogeneratore raggiunge, in caso di distacco dal mozzo, mentre la pala è in rotazione per otto modelli di

GRV Wind Shardana Srl 	STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI		Cod. AS311-SIA12-R
			Data Dicembre 2023

aerogeneratori dimostrando che il primo caso (moto ideale irrotazionale) restituisce dei valori nettamente superiori al terzo caso (moto reale rotazionale complesso).

2.1 IPOTESI DI CALCOLO

Una volta definito il modello di calcolo, è possibile delineare le ipotesi che stanno alla base del calcolo che in seguito sarà presentato.

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo della gittata massima per distacco dell'intera pala sono le più gravose possibili in modo da giungere a risultati sicuramente cautelativi.

Per il calcolo della massima gittata si considerano le seguenti ipotesi:

- Resistenza fluidodinamica dell'aria trascurabile;
- Azione degli agenti atmosferici assente;
- Traiettoria della pala assimilabile a quella di un punto materiale coincidente col suo centro di massa;
- Quota della torre coincidente con la quota del punto di caduta (la differenza tra la quota di lancio e quella di impatto al suolo si ripercuote sul tempo di caduta al suolo e sulla gittata);
- Altezza del mozzo 113 m;
- Diametro del rotore 163 m;
- Lunghezza della pala 80,1 m (come riportato dalle schede tecniche della casa produttrice Vestas);
- Distanza del centro di massa dal mozzo 26,7 m. Tale distanza è stata valutata con buona approssimazione come 1/3 della lunghezza della pala;
- Velocità di rotazione del rotore 12,1 rpm.

Con lo studio del moto di un proiettile si intende fornire un modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati con un certo angolo di alzo, velocità costante e moto parabolico.

Il moto di un proiettile è la composizione di due moti: uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale, e uno uniformemente accelerato (con accelerazione di gravità) in direzione verticale. Ne segue che la traiettoria seguita da un corpo, se è denso e poco esteso, o altrimenti dal suo centro di massa, ha un andamento parabolico.

La gittata è la distanza orizzontale tra il punto in cui viene lanciato un proiettile (con vettore velocità iniziale inclinato verso l'alto rispetto all'orizzontale) e il punto in cui esso ritorna al suolo.

Per studiare la gittata di un proiettile che si muove con moto parabolico (cioè sotto l'azione della sola forza peso e trascurando l'attrito con l'aria) si utilizzerà un sistema di riferimento cartesiano XY in cui l'origine O degli assi del sistema, coincida con il punto da cui il proiettile è stato lanciato.

Inoltre, si precisa che poiché il distacco della pala è un evento più probabile del distacco di un frammento di essa, essendo il punto di attacco al mozzo un potenziale punto critico, si procederà a una trattazione semplificata per il distacco dell'intera per operare a vantaggio di sicurezza mentre per il distacco dei frammenti della pala si procederà considerando la resistenza dell'aria.

2.2 EQUAZIONI DELLA CINEMATICA

Lo schema a cui si fa riferimento per la scrittura delle equazioni della cinematica è il seguente:

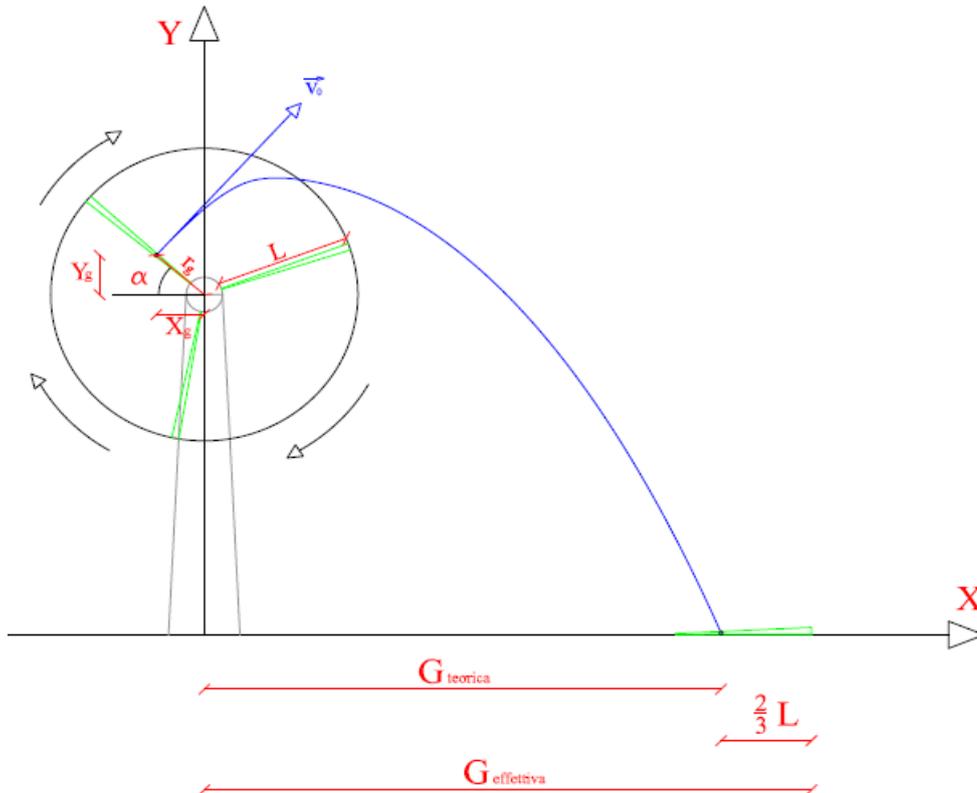


Figura 2: schema della gittata con un angolo compreso tra 0° e 90°

Considerando l'asse y orientata verso l'alto, le componenti del vettore accelerazione sono:

$$a_x = 0 \quad a_y = -g = -9,81 \text{ m/s}^2 \quad (1)$$

Indicando con v_0 la velocità iniziale e α l'inclinazione rispetto all'orizzontale, le componenti del vettore velocità sono:

$$v_x = v_0 \cos \alpha \quad v_y = v_0 \sin \alpha \quad (2)$$

Poiché il moto lungo x è rettilineo uniforme, valgono le seguenti leggi orarie:

$$v_x = v_{x,0} \quad (3)$$

$$x = x_0 + v_{x,0}t \quad (4)$$

Poiché il moto lungo y è uniformemente accelerato, valgono le seguenti leggi orarie:

$$v_y = gt + v_{y,0} \quad (5)$$

GRV Wind Shardana Srl 	STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI		Cod. AS311-SIA12-R
			Data Dicembre 2023 Rev. 00

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y,0}t + y_0 \quad (6)$$

L'istante di tempo per il quale la pala tocca terra si ottiene imponendo nella (6) y pari a 0:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y,0}t + y_0 = 0 \quad (7)$$

L'altezza di lancio è data dalla somma tra l'altezza del mozzo e la distanza verticale del baricentro dal mozzo, come riportato nella figura precedente:

$$y_0 = H_g = H_{torre} + Y_g \quad (8)$$

Y_g è nota grazie alla distanza del centro di massa dal mozzo r_g :

$$Y_g = r_g \cos \alpha \quad (9)$$

Si può risolvere la (7) rispetto a t :

$$t = \frac{-v_{y,0} \pm \sqrt{v_{y,0}^2 - 4\left(\frac{1}{2}gy_0\right)}}{g} \quad (10)$$

La (10) deve essere sostituita nella (4) per determinare la gittata x_G .

2.3 VELOCITA' PERIFERICA

La velocità angolare media ω è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo.

Si indica 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 rad, dopo n giri il corpo descrive in un minuto un angolo pari a $2\pi n$ rad. Quindi, la velocità angolare è:

$$\omega = \frac{2\pi n \text{ rad}}{60 \text{ s}} \quad (11)$$

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il baricentro G percorre la circonferenza $2\pi r$; dopo n giri al minuto lo spazio percorso sarà $2\pi r n$ m/min.

Quindi, la velocità periferica del baricentro è:

$$v_0 = \frac{2\pi r n}{60} = \frac{2\pi \cdot 26,7 \cdot 12,1 \text{ m}}{60} = 33,83 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (12)$$

Se si volesse considerare l'effetto dell'attrito dell'aria, il valore della velocità del baricentro risulterebbe, secondo studi empirici, ridotta del 20% rispetto all'assenza di resistenze, divenendo pari a 26,81 m/s.

2.4 GITTATA PALA INTERA

L'equazione della gittata, in base a considerazioni precedentemente fatte, è:

$$x_G = \frac{v_{x,0} \left(v_{y,0} + \sqrt{v_{y,0}^2 + 2gH_g} \right)}{g} - X_g + \frac{2}{3}L \quad (13)$$

Al valore di gittata è stata sottratta la distanza X_g del baricentro rispetto all'asse della torre e aggiunta la distanza del vertice della pala dal baricentro. La distanza X_g è data da:

$$X_g = r_g \sin \alpha \quad (14)$$

L'equazione per il calcolo della gittata effettiva (1.13) è stata risolta per diversi valori di α .

Si riportano i risultati ottenuti nella tabella seguente:

Angolo α	n	L	H _{torre}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
47	12,10	79,35	113,00	36,24	26,50	24,72	133,92	163	28,60	9,81	201,01	19,51	52,90	253,91
48	12,10	79,35	113,00	36,24	26,93	24,25	134,25	163	28,60	9,81	203,26	19,14	52,90	256,16
49	12,10	79,35	113,00	36,24	27,35	23,78	134,58	163	28,60	9,81	205,38	18,76	52,90	258,28
50	12,10	79,35	113,00	36,24	27,76	23,29	134,91	163	28,60	9,81	207,35	18,38	52,90	260,25
51	12,10	79,35	113,00	36,24	28,16	22,81	135,23	163	28,60	9,81	209,20	18,00	52,90	262,10
52	12,10	79,35	113,00	36,24	28,56	22,31	135,54	163	28,60	9,81	210,90	17,61	52,90	263,80
53	12,10	79,35	113,00	36,24	28,94	21,81	135,84	163	28,60	9,81	212,47	17,21	52,90	265,37
54	12,10	79,35	113,00	36,24	29,32	21,30	136,14	163	28,60	9,81	213,91	16,81	52,90	266,81
55	12,10	79,35	113,00	36,24	29,69	20,79	136,43	163	28,60	9,81	215,22	16,40	52,90	268,12
56	12,10	79,35	113,00	36,24	30,04	20,26	136,71	163	28,60	9,81	216,39	15,99	52,90	269,29
57	12,10	79,35	113,00	36,24	30,39	19,74	136,99	163	28,60	9,81	217,44	15,58	52,90	270,34
58	12,10	79,35	113,00	36,24	30,73	19,20	137,25	163	28,60	9,81	218,35	15,16	52,90	271,25
59	12,10	79,35	113,00	36,24	31,06	18,66	137,51	163	28,60	9,81	219,14	14,73	52,90	272,04
60	12,10	79,35	113,00	36,24	31,38	18,12	137,77	163	28,60	9,81	219,81	14,30	52,90	272,71
61	12,10	79,35	113,00	36,24	31,70	17,57	138,01	163	28,60	9,81	220,35	13,87	52,90	273,25
62	12,10	79,35	113,00	36,24	32,00	17,01	138,25	163	28,60	9,81	220,78	13,43	52,90	273,68
63	12,10	79,35	113,00	36,24	32,29	16,45	138,48	163	28,60	9,81	221,08	12,98	52,90	273,98
64	12,10	79,35	113,00	36,24	32,57	15,89	138,71	163	28,60	9,81	221,27	12,54	52,90	274,17
65	12,10	79,35	113,00	36,24	32,84	15,32	138,92	163	28,60	9,81	221,35	12,09	52,90	274,25
66	12,10	79,35	113,00	36,24	33,11	14,74	139,13	163	28,60	9,81	221,31	11,63	52,90	274,21
67	12,10	79,35	113,00	36,24	33,36	14,16	139,33	163	28,60	9,81	221,17	11,17	52,90	274,07
68	12,10	79,35	113,00	36,24	33,60	13,58	139,52	163	28,60	9,81	220,92	10,71	52,90	273,82
69	12,10	79,35	113,00	36,24	33,83	12,99	139,70	163	28,60	9,81	220,57	10,25	52,90	273,47
70	12,10	79,35	113,00	36,24	34,05	12,39	139,88	163	28,60	9,81	220,12	9,78	52,90	273,02
71	12,10	79,35	113,00	36,24	34,26	11,80	140,04	163	28,60	9,81	219,57	9,31	52,90	272,47
72	12,10	79,35	113,00	36,24	34,47	11,20	140,20	163	28,60	9,81	218,92	8,84	52,90	271,82
73	12,10	79,35	113,00	36,24	34,66	10,60	140,35	163	28,60	9,81	218,19	8,36	52,90	271,09
74	12,10	79,35	113,00	36,24	34,84	9,99	140,49	163	28,60	9,81	217,37	7,88	52,90	270,27
75	12,10	79,35	113,00	36,24	35,00	9,38	140,63	163	28,60	9,81	216,46	7,40	52,90	269,36

Tabella 2. Valori della gittata al variare dell'angolo della pala rispetto all'asse orizzontale.

Dall'analisi della gittata si ottiene che la massima distanza percorsa dal baricentro della pala è pari a **274,25 m** e corrisponde a un angolo della pala rispetto all'orizzontale pari a **65°**.

Si ricorda che il valore ottenuto è sufficientemente cautelativo nei confronti dei ricettori in virtù del modello teorico adottato.

2.5 GITTATA FRAMMENTI

In questo paragrafo è presentata la procedura di calcolo adottata per la valutazione della gittata dei frammenti di 10 m, 5 m e 2 m mediante una procedura alle differenze finite. In funzione della lunghezza del frammento, si valuta la distanza del baricentro del frammento dal mozzo, la cui posizione può essere assunta a metà lunghezza dei frammenti, essendo elementi tozzi rispetto all'intera pala:

$$r_g = \frac{1}{2}L + (L_p - L) = L_p - \frac{1}{2}L \quad (15)$$

Grazie alla (15) possono essere valutate le componenti della velocità e le posizioni del baricentro all'istante 0 come fatto analogamente per l'intera pala.

Per il calcolo della gittata dei frammenti, si adotta il seguente sistema di riferimento:

- 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.

La resistenza aerodinamica dovuta all'aria può essere scomposta secondo le sue componenti principali:

$$F_{xz} = -\frac{1}{2}C_D\rho S v_x^2 \quad F_y = -\frac{1}{2}C_D\rho S (w - v_y)^2 \quad (16)$$

Avendo indicato con:

- C_D il coefficiente di resistenza aerodinamica assunto pari a 1,15 per la forma tozza del frammento;
- ρ la densità dell'aria, assunta pari a 1,225 kg/m³;
- S la superficie del frammento di pala ortogonale alla direzione del moto;
- w è la massima velocità del vento, assunta pari a quella di cut off di 24 m/s.

Mediante l'applicazione del secondo principio della dinamica, è possibile scrivere tre equazioni per il calcolo delle componenti dell'accelerazione:

$$m \cdot a_x(t) = -F_{xz}(t) \cdot \cos \beta(t) \quad (18)$$

$$m \cdot a_y(t) = -F_y(t) \quad (19)$$

$$m \cdot a_z(t) = -F_{xz}(t) \cdot \sin \beta(t) - m \cdot g \quad (20)$$

Avendo indicato con:

- $\beta = \arctg \frac{v_z}{v_x}$;
- m è la massa del frammento.

Note le componenti dell'accelerazione, possono essere valutate le componenti della velocità:

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + a_x(t) \cdot \Delta t \quad (21)$$

$$v_y(t + \Delta t) = v_y(t) + a_y(t) \cdot \Delta t \quad (22)$$

$$v_z(t + \Delta t) = v_z(t) + a_z(t) \cdot \Delta t \quad (23)$$

Infine, possono essere valutate le componenti dello spostamento:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v_x(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_x \cdot \Delta t^2 \quad (24)$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + v_y(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_y \cdot \Delta t^2 \quad (25)$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) + v_z(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_z \cdot \Delta t^2 \quad (26)$$

Tali equazioni possono essere integrate adottando un procedimento alle differenze finite con un passo di integrazione sufficientemente piccolo. È stato assunto un passo Δt pari a 0,001 s. La risoluzione delle precedenti equazioni consente di determinare il punto di coordinate $(x_{max}, y_{max}, 0)$. La gittata, quindi, nel sistema di riferimento cartesiano a tre assi, è valutabile nel modo seguente:

$$G = \sqrt{x_{max} + y_{max}} \quad (27)$$

A tale valore va sommata la distanza del vertice del frammento dal suo baricentro e va sottratta la distanza del baricentro dall'asse della torre, in virtù dell'ipotesi di aver considerato un angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale nell'intervallo $[0^\circ, 90^\circ]$:

$$G_R = \sqrt{x_{max} + y_{max}} - X_g + 0,5L_p \quad (28)$$

Si riportano di seguito i valori di gittata ottenuti per i frammenti di 10 m, 5 m e 2 m:

Lunghezza frammento (m)	2	5	10
Peso frammento (kg)	240	463	926
Coefficiente di forma	1	1	1
Superficie efficace di resistenza al moto (m ²)	2,5	6,5	15
Angolo di gittata max ottenuto per tentativi (gradi)	5	1	1
Gittata massima (m)	315,76	245,15	231,70

Tabella 3: Gittata dei frammenti

I valori di gittata in Tabella 3 sono stati ottenuti considerando un dislivello tra quota suolo torre e quota ricevitore tale da massimizzare la gittata. Tale dislivello, infatti, è tale per cui al diminuire della quota del ricevitore non si ha un aumento di gittata poiché l'andamento della traiettoria del frammento è asintotico:

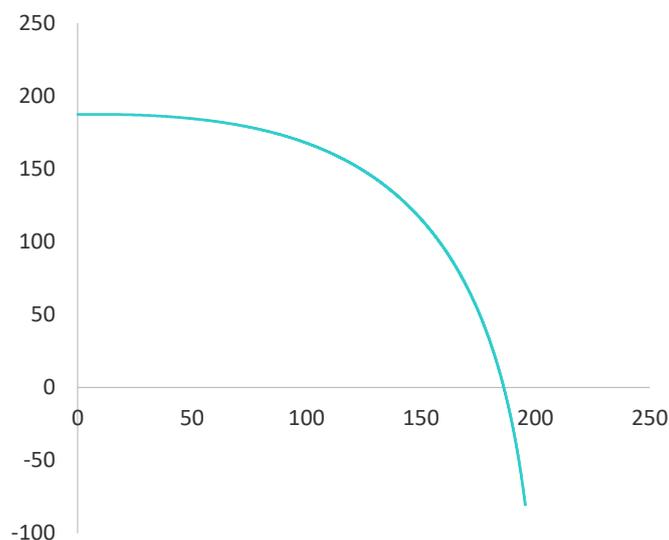


Figura 3: traiettoria del frammento di 10 m

L'analisi sui ricettori sarà effettuata considerando il valore massimo di gittata ottenuto, ovvero quello riferito al frammento di 2 m.

2.6 ANALISI SUI RICETTORI

Di seguito sono mostrate le immagini su ortofoto delle posizioni degli aerogeneratori e dei ricettori ad essi più vicini:

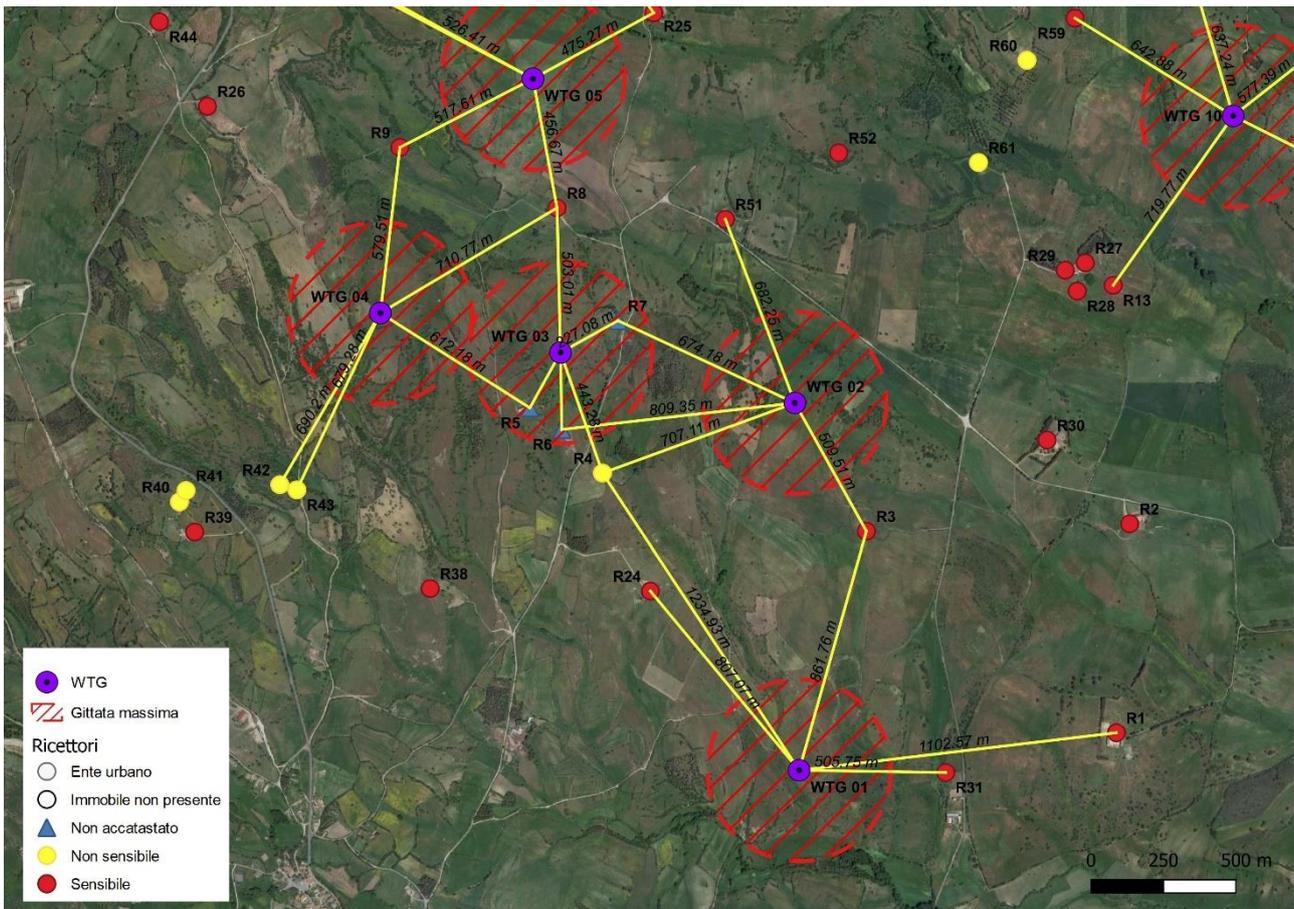


Figura 4. Analisi dei ricettori per le turbine WTG 01, WTG 02, WTG 03 e WTG 04.

Per ogni aerogeneratore sono state evidenziate le distanze dai cinque ricettori più vicini ad esso.

Dalla Figura 4 risulta che la WTG 03 interferisce con tre ricettori non accatastati R5, R6 e R7:



Figura 5. Foto dei ricettori R5 e R6.



Figura 6. Foto del ricettore R7

Da foto effettuate in sopralluogo, risulta che i ricettori R5, R6 ed R7 si configurano come elementi non sensibili, poiché assimilabili a magazzini o stalle.

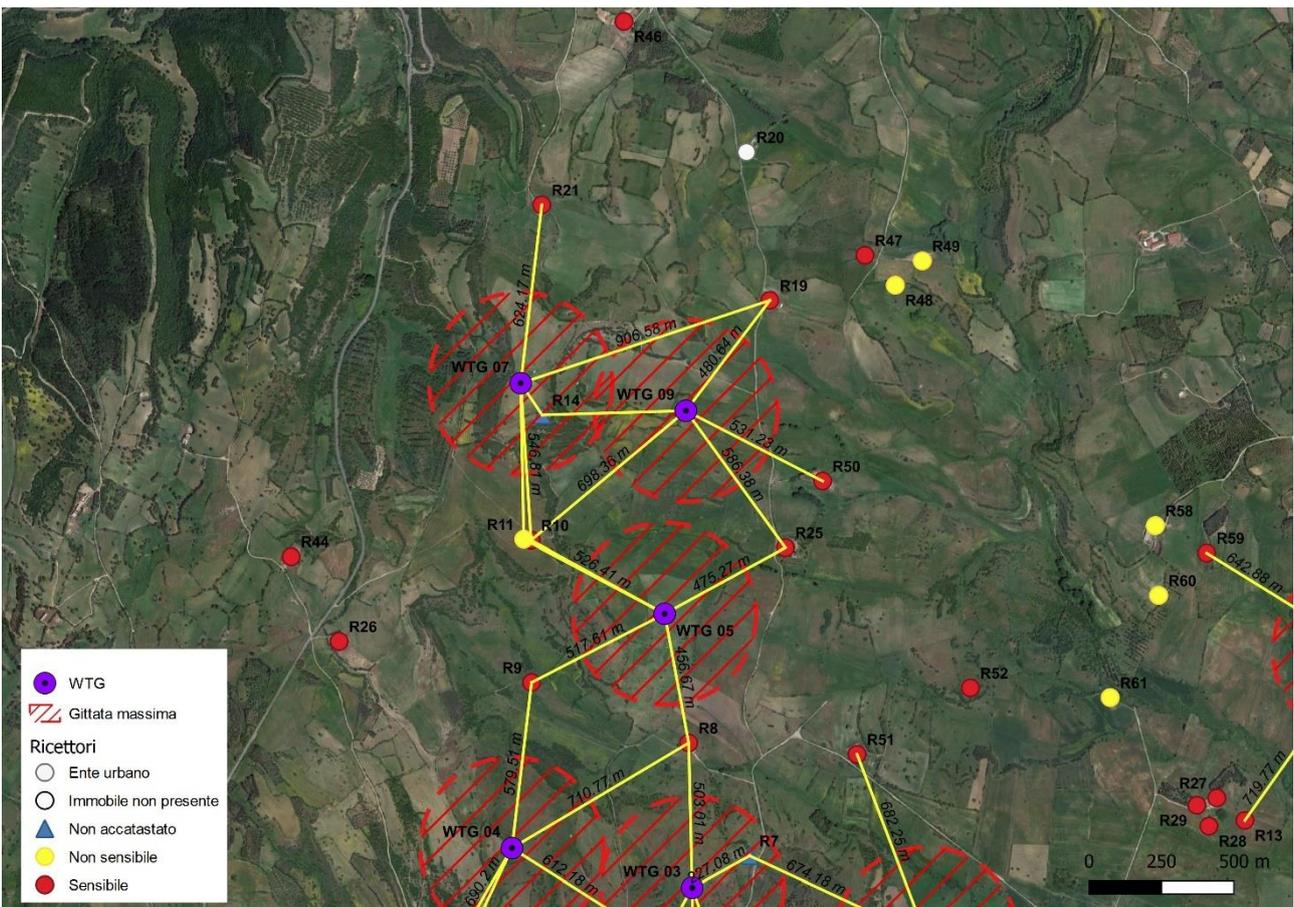


Figura 7. Analisi dei ricettori per le turbine WTG 05, WTG 07 e WTG 09.

Dalla Figura 7 risulta che il ricettore non accatastato R14 rientra nel raggio di gittata della turbina WTG 07.



Figura 8. Foto del ricettore R14

Da foto effettuate in sopralluogo risulta che il ricettore non accatastato R14 si configura come un magazzino o stalla, pertanto non sensibile.

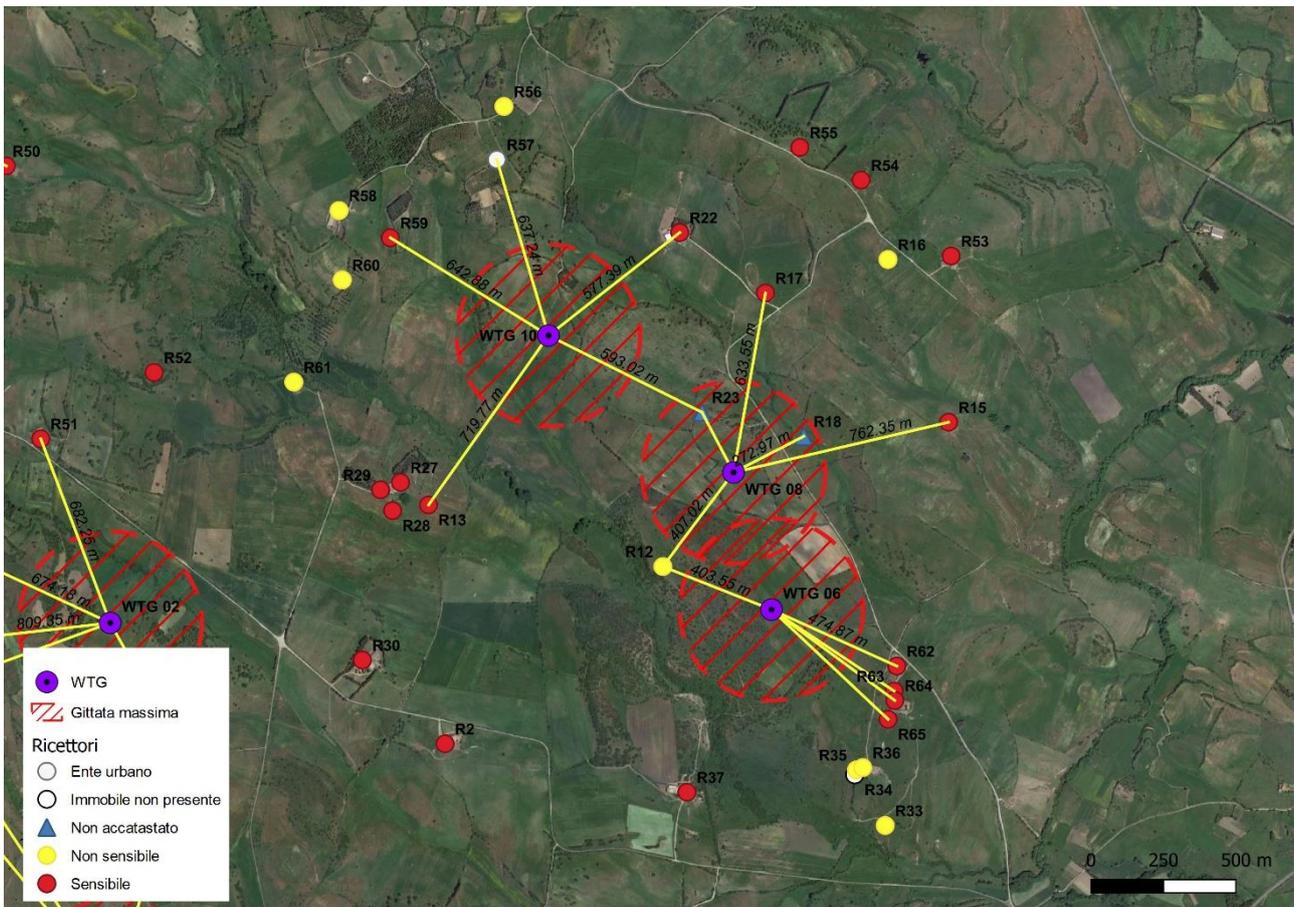


Figura 9. Analisi dei ricettori per le turbine WTG 06, WTG 08, e WTG 10.

Dalla Figura 9 risulta che i ricettori non accatastati R18 ed R23 rientrano nel raggio di gittata dell'aerogeneratore WTG 08.



Figura 10. Foto de ricettore R18



Figura 11. Foto del ricettore R23

Da foto effettuate in sopralluogo risulta che i ricettori R18 e R23 sono unità collabenti, pertanto non sensibili.

In definitiva, non si rilevano criticità in merito alla gittata di elementi rotanti per rottura accidentale, poiché tutti i ricettori che ricadono nel raggio di gittata dalle turbine risultano non sensibili, in quanto non interessate da presenza di persone per almeno 4 ore al giorno.

3 PROBABILITA' DI ACCADIMENTO

Per definire meglio il problema relativo alla rottura di elementi rotanti, in quanto evento aleatorio, è necessario effettuare considerazioni di carattere probabilistico. Il processo di rottura di un aerogeneratore è un evento raro, risultato dell'accadimento di eventi indipendenti, la cui probabilità totale è data dal prodotto delle probabilità dei singoli eventi indipendenti, attraverso i quali si giunge al risultato finale. Tale valore di probabilità deve necessariamente non superare il valore di soglia, che dipende dall'oggetto da proteggere. La relazione, che traduce il concetto ora esposto, si basa sulla seguente disuguaglianza:

$$P_{so} > P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \quad (1.17)$$

- P_{so} è il valore di soglia relativo all'oggetto da difendere;
- P_1 è la probabilità di accadimento dell'evento incidentale accaduto alla turbina eolica;
- P_2 è la probabilità che si verifichi l'urto tra l'oggetto da proteggere e la pala;
- P_3 è la probabilità di condizione di vento sfavorevole o dei condizionamenti ambientali;
- P_4 è la probabilità di accadimento di altre cause, come errori in fase di costruzione.

In relazione al rischio di rottura, si riportano i risultati del documento "Analysis Of Risk Involved Incidents Of Wind Turbines", allegato alla "Guide for Risk-Based Zoning of Wind Turbines", elaborato nel 2005 dall' ECN (Energy Research Centre of the Netherlands) sulla base dei dati relativi a produzione di energia eolica, incidenti e manutenzione raccolti dallo ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik) in Germania e dall' EMD (Energie- og Miljødata) in Danimarca. L'ECN ha analizzato le informazioni di incidenti registrate su un campione molto largo di turbine eoliche in Danimarca e Germania, determinando le frequenze di:

- rottura di una pala;
- rottura della punta e di piccole parti;
- rottura della torre alla base;
- caduta del rotore o della navicella;
- caduta di piccole parti dal rotore o dalla navicella.

I risultati dell'analisi, riportati nella tabella sottostante, mostrano come la frequenza di rottura di un frammento di pala sia pari a circa 0,00026% all'anno:

Part	Failure frequency per turbine per year			Maximum throw distance [m] (reported and confirmed)
	Expected Value	95% upper limit	Recommended Risk Analysis Value [1/yr]	
Entire blade	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$	150
Nominal rpm			$4.2 \cdot 10^{-4}$	
Mechanical braking			$4.2 \cdot 10^{-4}$	
Overspeed			$5.0 \cdot 10^{-6}$	
Tip or piece of blade	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	500
Tower	$5.8 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	Shaft height + half diameter
Nacelle and/or rotor	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	Half diameter
Small parts from nacelle	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	Half diameter

Tabella 4. Probabilità di rottura aerogeneratore e massima gittata riportata e confermata

GRV Wind Shardana Srl 	STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI		Cod. AS311-SIA12-R	
			Data Dicembre 2023	Rev. 00

La frequenza di rottura di un frammento della pala è minore di quella di rottura dell'intera pala, essendo infatti il punto di attacco della pala al rotore quello maggiormente critico.

4 CONCLUSIONI

La definizione del moto di una pala di un aerogeneratore è un problema alquanto complesso. Sulla base dell'esperienza e di semplici considerazioni fisiche (conservazione della quantità di moto) è certo che si tratta di un moto rotazionale complesso in un fluido viscoso (aria).

Dal momento che sono stati considerati per ciascun parametro valori ampiamente conservativi (massima velocità di rotazione, massima velocità del vento, massimo dislivello tra quota torre e punto di impatto), il valore della gittata calcolato si può considerare ampiamente cautelativo, pertanto da considerarsi come gittata massima teorica.

Quindi, i ricettori precedentemente citati che interferiscono con la gittata massima, oltre ad essere stati catalogati non sensibili a seguito del sopralluogo in sito non destano alcuna preoccupazione sulla gittata degli elementi rotanti, che di per sé è già un evento molto raro, la cui probabilità di accadimento è il prodotto tra la probabilità di accadimento dell'evento di rottura, di urto tra il frammento e un ricettore, e di condizioni ambientali sfavorevoli. La simultaneità di tali eventi, quindi, è certamente molto poco probabile.