



REGIONE
SICILIA



PROVINCIA DI
AGRIGENTO



COMUNE DI
NARO



COMUNE DI
LICATA

**PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO
COMPOSTO DA 12 AEROGENERATORI DA 6.0 MW PER UNA POTENZA
COMPLESSIVA DI 72 MW SITO NEL COMUNE DI NARO (AG)
CON OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI NARO (AG) E LICATA (AG)**



<p>Proponente</p>	 <p>SIRIO RINNOVABILI S.R.L. Largo Augusto n.3 20122 Milano pec:siriorinnovabili@legalmail.it</p>  				
<p>Progettazione</p>	 <p>Viale Michelangelo, 71 80129 Napoli TEL. 081 579 7998 mail: tecnico@inesrl.it</p> <p>Amm. Francesco Di Maso Ing. Nicola Galdiero Ing. Pasquale Esposito</p> <p>Collaboratori: Ing. R. M. De Lucia Dott. G. Giardina Dott. Angelo Scuderi Eikon servizi per i beni culturali SAS Geol. V.E. Iervolino SR International Srl Arch. C. Gaudiero Ing. F. Quarto Ing. R. D'Onofrio Ing. M. Ciano</p>				
<p>Elaborato</p>	<p>Nome Elaborato:</p> <p style="text-align: center;">STUDIO DELLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI</p>				
<p>00</p>	<p>Ottobre 2023</p>	<p>PRIMA EMISSIONE</p>	<p>INSE Srl</p>	<p>INSE Srl</p>	<p>Sirio Rinnovabili s.r.l.</p>
<p>Rev.</p>	<p>Data</p>	<p>Oggetto della revisione</p>	<p>Elaborazione</p>	<p>Verifica</p>	<p>Approvazione</p>
<p>Scala:</p>	<p>---</p>				
<p>Formato:</p>	<p>A4</p>	<p>Codice Pratica S314</p>	<p>Codice Elaborato</p>	<p>AS314-SIA12-R</p>	

Sommario

1	PREMESSA.....	2
1.1	DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO.....	2
2	STUDIO DEL MOTO DEL PROIETTILE: DISTACCO DELL'INTERA PALA.....	5
2.1	IPOSTESI DI CALCOLO	6
2.2	EQUAZIONI DELLA CINEMATICA.....	7
2.3	VELOCITA' PERIFERICA.....	9
2.4	GITTATA PALA INTERA	9
2.5	GITTATA FRAMMENTI.....	10
2.6	ANALISI SUI RICETTORI	12
3	PROBABILITA' DI ACCADIMENTO.....	19
4	CONCLUSIONI	20

 Sirio Rinnovabili Srl Largo Augusto n.3 20122 Milano pec:siriorinnovabili@legalmail.it	STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI		Cod. AS314-SIA12-R
	Data Ottobre 2023	Rev. 00	

1 PREMESSA

La società Sirio Rinnovabili Srl, è proponente di un progetto di produzione di energia rinnovabile da fonte eolica ubicato nel Comune di Naro in provincia di Agrigento con annesse opere di connessione nei Comuni di Naro (AG), Campobello di Licata (AG) e Licata (AG).

L'ipotesi progettuale prevede l'installazione di n.12 aerogeneratori della potenza nominale di 6,0 MW per una potenza complessiva di impianto pari a 72 MW. Gli aerogeneratori saranno collegati tra loro attraverso cavidotti interrati a 36 kV che collegheranno il parco eolico ad una cabina utente 36kV di smistamento e sezionamento e da questa alla futura SE RTN di trasformazione 220/36 kV di Licata (AG), che rappresenta il punto di connessione dell'impianto alla RTN.

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

L'ambito territoriale considerato si trova nella porzione Centro-Sud della Regione Sicilia. I comuni interessati dal progetto sono il Comune di Naro (AG) per quanto concerne l'impianto eolico, ed il Comune di Campobello di Licata (AG) e Licata (AG) per quanto concerne la connessione alla RTN.

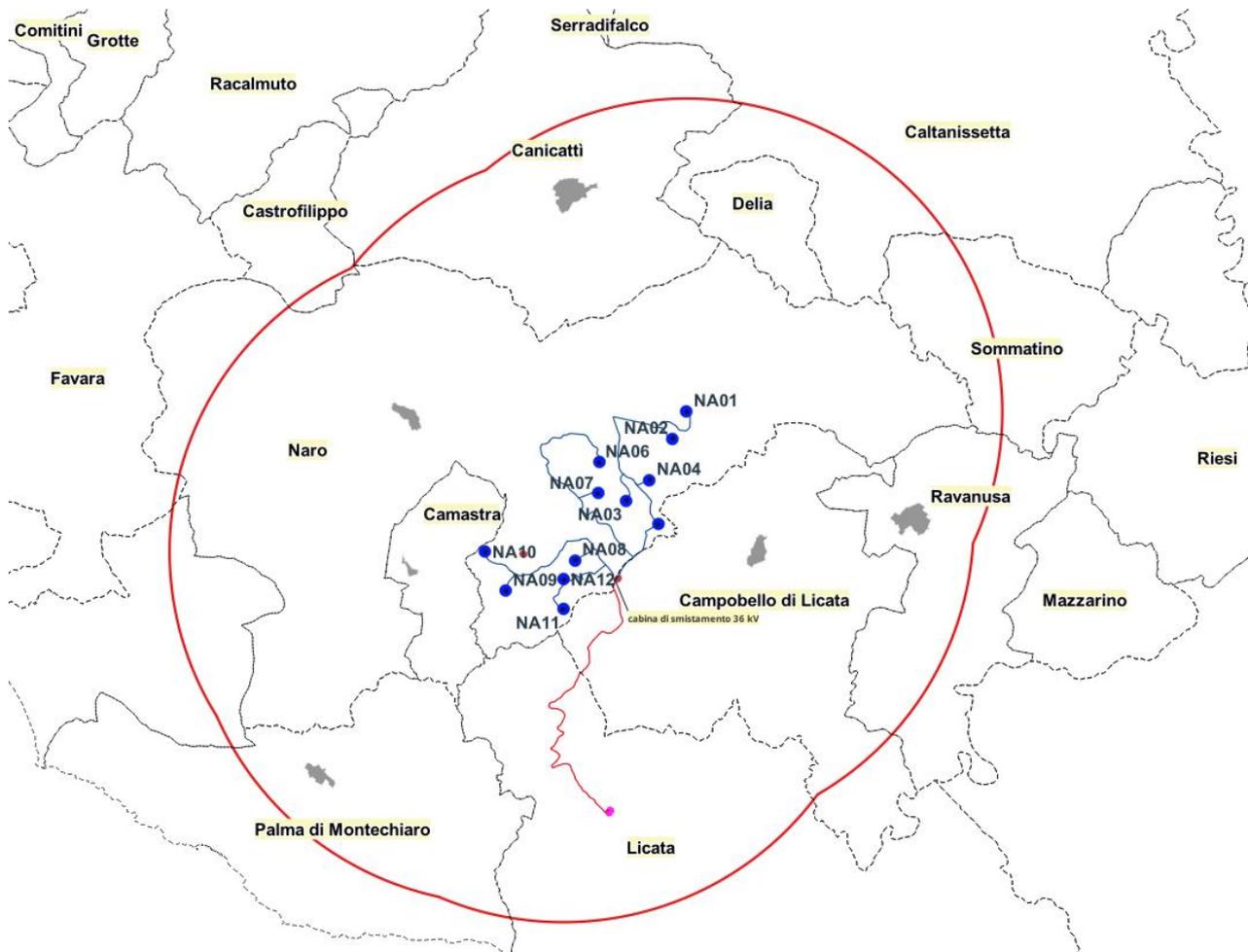


Figura 1: inquadratura territoriale

L'area vasta, che è individuata su cartografia come l'involuppo delle distanze dagli aerogeneratori di ampiezza pari a 50 Hmax, è ampia 10 km e comprende invece altri Comuni che sono interessati prevalentemente da impatti di tipo visivo (Canicatti, Delia, Caltanissetta, Sommatino, Ravanusa, Campobello di Licata, Naro, Camastra, Palma di Montechiaro, Licata). Sono stati analizzati tutti gli aspetti programmatici, vincolistici ed ambientali presente nell'area vasta.

Il sito oggetto di intervento ricade nei Fogli IGM 271-I-NE (Campobello di Licata) 271-I-SE (Favarotta) 271-I-SO (NPalma di Montechiaro) e 271-I-NO (Naro) scala 1:25.000 e si sviluppa tra quote comprese da 255 a 343 m s.l.m. Naro è collocata su un altipiano a circa 560 m s.l.m. mare ed il territorio è formato da andamento collinare e attraversato da vallate destinate alla coltivazione. Le opere di connessione RTN sono localizzate in un'area agricola del comune di Licata.

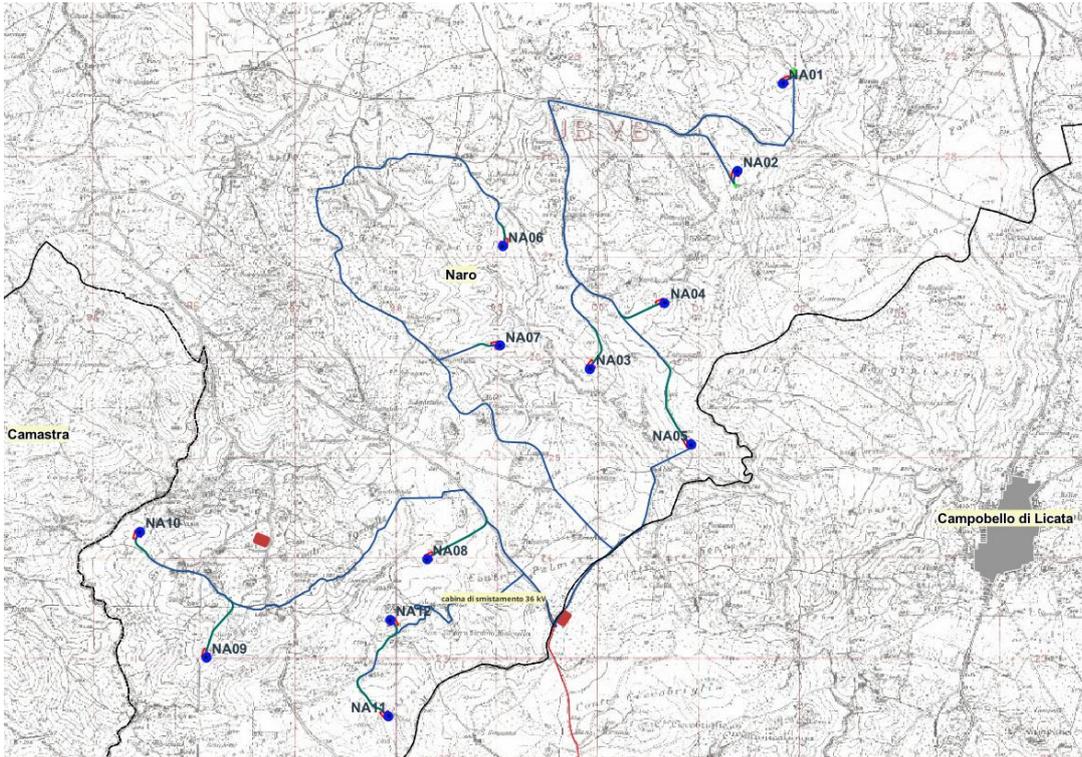
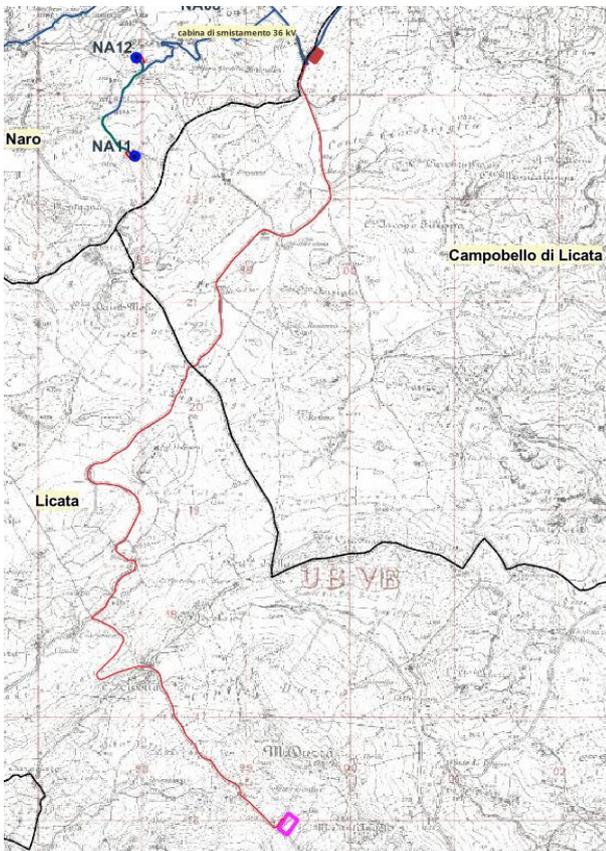


Figura 2 - Indicazione area di intervento su IGM Area Parco



- Aerogeneratore di progetto
- Strade di nuova realizzazione
- Piazzola in fase di esercizio
- Piazzola in fase di montaggio
- Cavidotto AT 36 kV interno al parco
- Cavidotto AT 36 kV esterno al parco
- Area di cantiere
- Cabina di smistamento
- Stazione RTN 220-36kV Licata

Figura 3: Area di intervento cavidotto esterno al parco

Le caratteristiche principali del Comune interessato dall'attività sono di seguito riportate:

COMUNE	ALTITUDINE	SUP.KMQ	ABITANTI	DENSITÀ (ab/Kmq)
Naro (Ag)	560	207,49	7.007 (01/01/2023)	33,77

In particolare, i 12 aerogeneratori saranno localizzati alle seguenti coordinate:

ID WTG	Coordinate WGS 84 UTM33		Caratteristiche turbina			Altitudine (m.s.l.m)	Altezza TIP (m.s.l.m)
	Long. EST (m)	Long. NORD (m)	Modello WTG	Altezza mozzo (m)	Altezza TIP (m)		
NA01	401783,53	4128545,08	Vestas 6.0 MW - 162	119	200	343	543
NA02	401332,49	4127670,09	Vestas 6.0 MW - 162	119	200	321	521
NA03	399870,02	4125695,96	Vestas 6.0 MW - 162	119	200	301	501
NA04	400610,55	4126357,58	Vestas 6.0 MW - 162	119	200	316	516
NA05	400872,20	4124939,12	Vestas 6.0 MW - 162	119	200	292	492
NA06	399000,07	4126919,07	Vestas 6.0 MW - 162	119	200	332	532
NA07	398973,99	4125927,20	Vestas 6.0 MW - 162	119	200	317	517
NA08	398250,00	4123794,00	Vestas 6.0 MW - 162	119	200	327	527
NA09	396057,69	4122815,02	Vestas 6.0 MW - 162	119	200	283	483
NA10	395399,23	4124070,03	Vestas 6.0 MW - 162	119	200	255	455
NA11	397870,31	4122232,50	Vestas 6.0 MW - 162	119	200	286	486
NA12	397885,00	4123190,00	Vestas 6.0 MW - 162	119	200	335	535

Tabella 1: Coordinate degli aerogeneratori in sistema UTM 33-WGS 84-Fuso33

L'aerogeneratore scelto in fase progettuale è di produzione Vestas V162 da 6 MW con rotore pari a 162 m di diametro e altezza mozzo pari a 119 m per una altezza totale pari a 200 m le cui caratteristiche sono di seguito riportate:

- Rotore di 162 m di diametro;
- Altezza al mozzo di 119 m;
- Altezza totale di 200 m.

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 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:

 Sirio Rinnovabili Srl Largo Augusto n.3 20122 Milano pec:siriorinnovabili@legalmail.it	STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI		Cod. AS314-SIA12-R
	Data Ottobre 2023	Rev. 00	

- 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 119 m;
- Diametro del rotore 162 m;
- Lunghezza della pala 79,35 m (come riportato dalle schede tecniche della casa produttrice Vestas);
- Distanza del centro di massa dal mozzo 26,45 m. Tale distanza è stata valutata con buona approssimazione come 1/3 della lunghezza della pala;
- Velocità di rotazione 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:

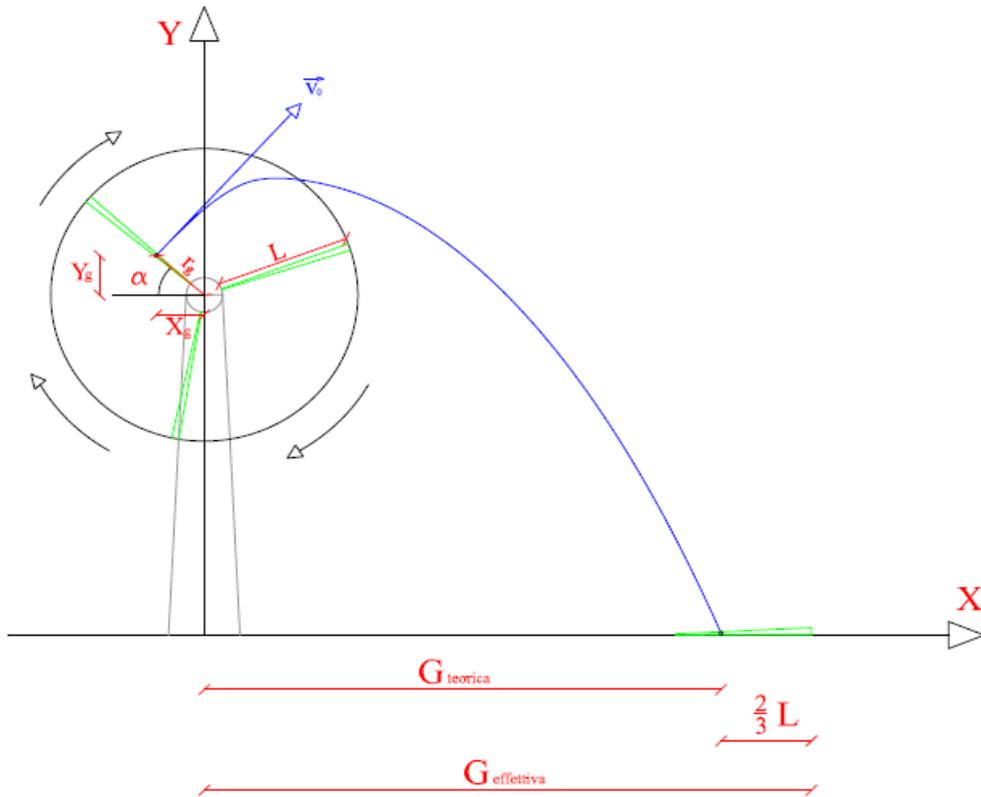


Figura 4: schema della gittata con un angolo compreso tra 0° e 90°

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:

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

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

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:

$$v_0 = \frac{2\pi r n}{60} = \frac{2\pi \cdot 26,45 \cdot 12,1 \text{ m}}{60 \text{ s}} = 33,52 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (12)$$

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	119.00	35.61	26.04	24.28	139.55	162	28.10	9.81	198.42	19.16	52.90	251.32
48	12.10	79.35	119.00	35.61	26.46	23.82	139.88	162	28.10	9.81	200.69	18.80	52.90	253.59
49	12.10	79.35	119.00	35.61	26.87	23.36	140.21	162	28.10	9.81	202.83	18.44	52.90	255.73
50	12.10	79.35	119.00	35.61	27.28	22.89	140.53	162	28.10	9.81	204.83	18.06	52.90	257.73
51	12.10	79.35	119.00	35.61	27.67	22.41	140.84	162	28.10	9.81	206.70	17.68	52.90	259.60
52	12.10	79.35	119.00	35.61	28.06	21.92	141.14	162	28.10	9.81	208.44	17.30	52.90	261.34
53	12.10	79.35	119.00	35.61	28.44	21.43	141.44	162	28.10	9.81	210.05	16.91	52.90	262.95
54	12.10	79.35	119.00	35.61	28.81	20.93	141.73	162	28.10	9.81	211.53	16.52	52.90	264.43
55	12.10	79.35	119.00	35.61	29.17	20.42	142.02	162	28.10	9.81	212.88	16.12	52.90	265.78
56	12.10	79.35	119.00	35.61	29.52	19.91	142.30	162	28.10	9.81	214.10	15.71	52.90	267.00
57	12.10	79.35	119.00	35.61	29.86	19.39	142.57	162	28.10	9.81	215.20	15.30	52.90	268.10
58	12.10	79.35	119.00	35.61	30.20	18.87	142.83	162	28.10	9.81	216.17	14.89	52.90	269.07
59	12.10	79.35	119.00	35.61	30.52	18.34	143.09	162	28.10	9.81	217.02	14.47	52.90	269.92
60	12.10	79.35	119.00	35.61	30.84	17.80	143.34	162	28.10	9.81	217.74	14.05	52.90	270.64
61	12.10	79.35	119.00	35.61	31.14	17.26	143.58	162	28.10	9.81	218.35	13.62	52.90	271.25
62	12.10	79.35	119.00	35.61	31.44	16.72	143.81	162	28.10	9.81	218.84	13.19	52.90	271.74
63	12.10	79.35	119.00	35.61	31.72	16.16	144.04	162	28.10	9.81	219.21	12.76	52.90	272.11
64	12.10	79.35	119.00	35.61	32.00	15.61	144.26	162	28.10	9.81	219.47	12.32	52.90	272.37
65	12.10	79.35	119.00	35.61	32.27	15.05	144.47	162	28.10	9.81	219.61	11.88	52.90	272.51
66	12.10	79.35	119.00	35.61	32.53	14.48	144.67	162	28.10	9.81	219.65	11.43	52.90	272.55
67	12.10	79.35	119.00	35.61	32.78	13.91	144.87	162	28.10	9.81	219.59	10.98	52.90	272.49
68	12.10	79.35	119.00	35.61	33.01	13.34	145.05	162	28.10	9.81	219.41	10.53	52.90	272.31
69	12.10	79.35	119.00	35.61	33.24	12.76	145.23	162	28.10	9.81	219.14	10.07	52.90	272.04
70	12.10	79.35	119.00	35.61	33.46	12.18	145.41	162	28.10	9.81	218.77	9.61	52.90	271.67
71	12.10	79.35	119.00	35.61	33.67	11.59	145.57	162	28.10	9.81	218.30	9.15	52.90	271.20
72	12.10	79.35	119.00	35.61	33.86	11.00	145.72	162	28.10	9.81	217.74	8.68	52.90	270.64
73	12.10	79.35	119.00	35.61	34.05	10.41	145.87	162	28.10	9.81	217.09	8.22	52.90	269.99
74	12.10	79.35	119.00	35.61	34.23	9.81	146.01	162	28.10	9.81	216.35	7.75	52.90	269.25
75	12.10	79.35	119.00	35.61	34.39	9.22	146.14	162	28.10	9.81	215.52	7.27	52.90	268.42

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 272,55 m e corrisponde a un angolo della pala rispetto all'orizzontale pari a 66°.

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, 2 m e 1 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 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, 2 m e 1 m:

- Gittata frammento 10 m = 212,83 m;
- Gittata frammento 5 m = 226,13 m;
- Gittata frammento 2 m = 325,25 m;
- Gittata frammento 1 m = 326,21 m.

Lunghezza frammento/ Pala intera (m)	1	2	5	10
Peso frammento (kg)	125	240	463	926
Coefficiente di forma	1,15	1,15	1,15	1,15
Superficie efficace di resistenza al moto (m ²)	1,3	2,5	6,5	15
Angolo di gittata max ottenuto per tentativi (gradi)	11	10	6	6
Tempo di volo (s)	10,8	10,07	9,98	9,86
Gittata massima (m)	333,70	333,85	227,75	214,83

L'analisi sui ricettori sarà effettuata considerando il valore massimo di gittata ottenuto, ovvero quello riferito al frammento di 1 m.

La gittata massima ottenuta si riferisce alla massima quota suolo torre del parco eolico, ovvero quella della turbina eolica NA01, e a un dislivello con il punto di impatto di 10 m, in modo da effettuare un'analisi a vantaggio di sicurezza per tutti gli aerogeneratori.

2.6 ANALISI SUI RICETTORI

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

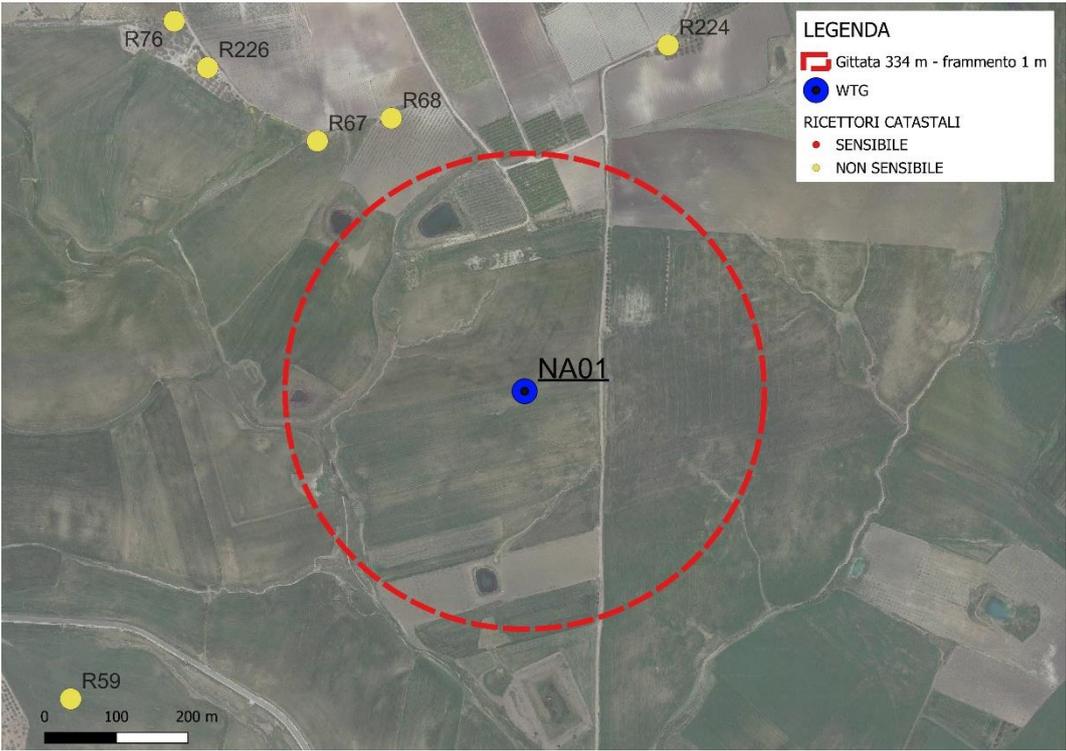


Figura 5. Analisi dei ricettori per la turbina NA01

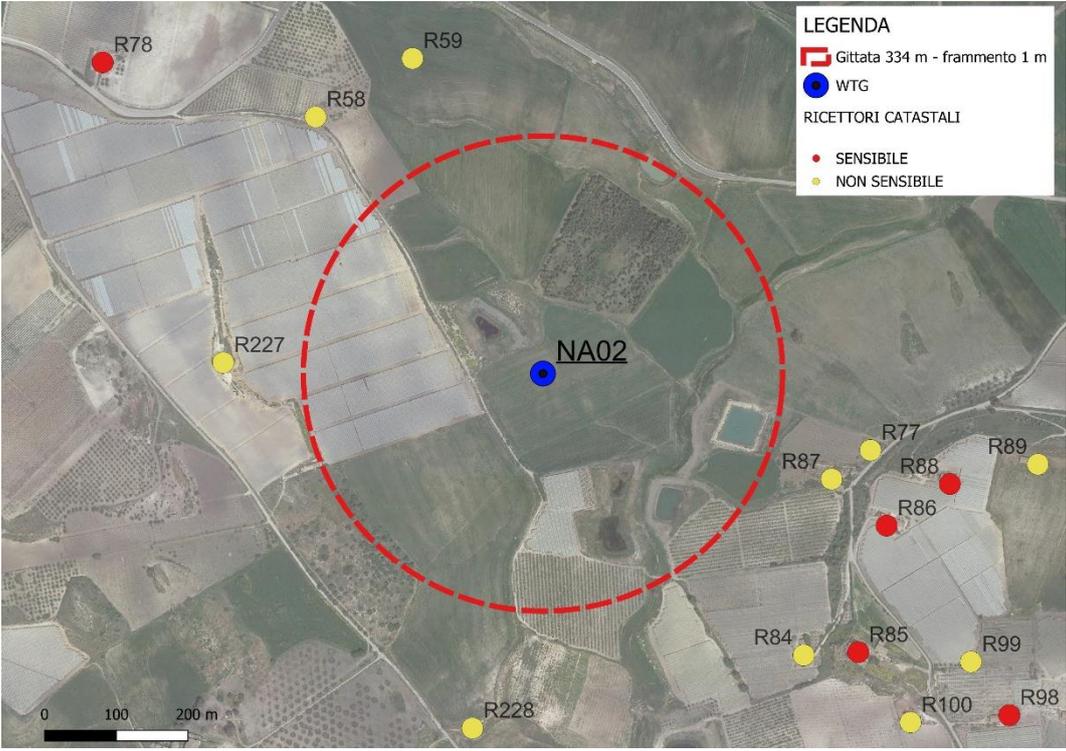


Figura 6. Analisi dei ricettori per la turbina NA02

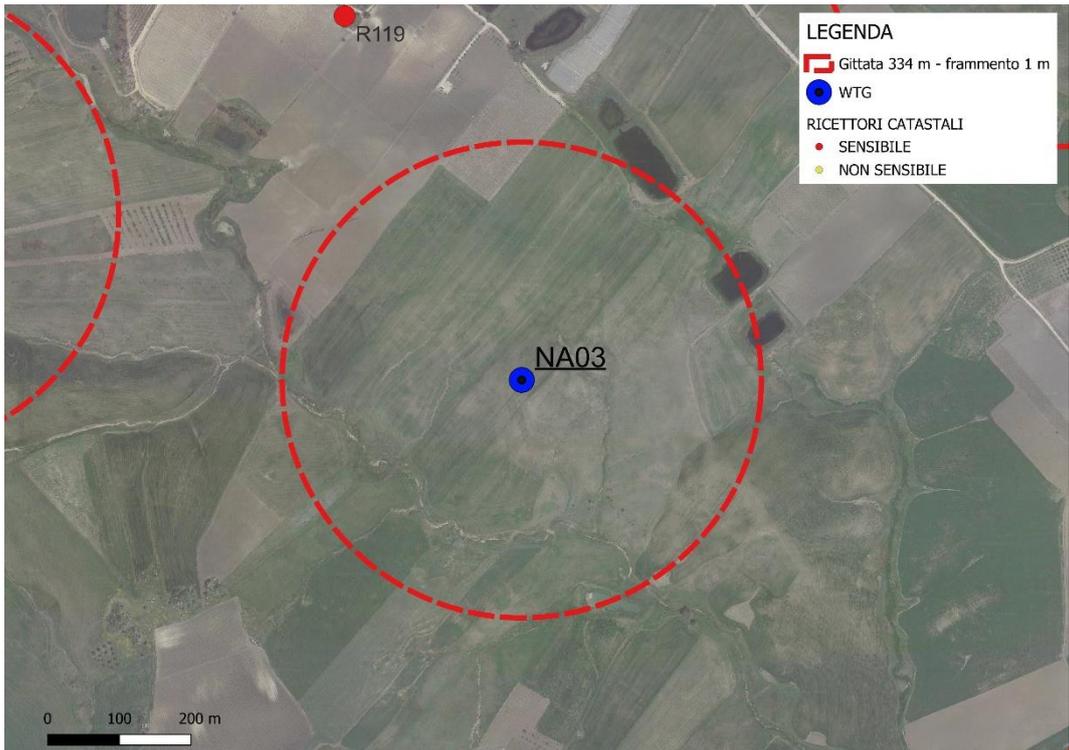


Figura 7. Analisi dei ricettori per la turbina NA03

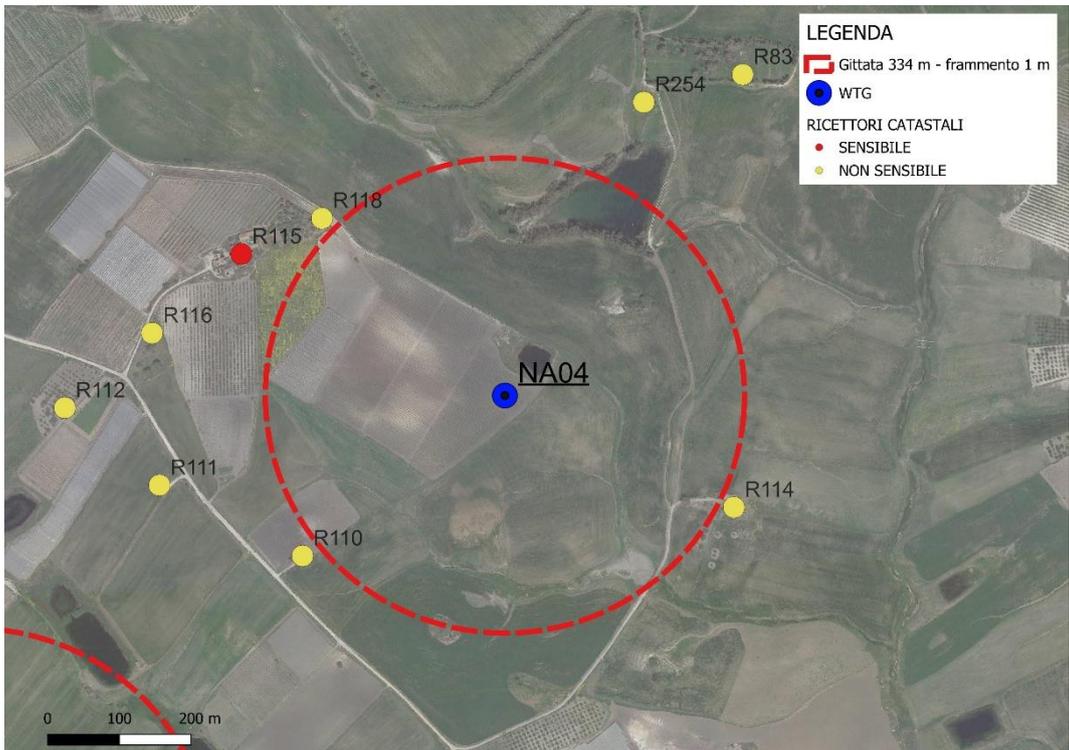


Figura 8. Analisi dei ricettori per la turbina NA04

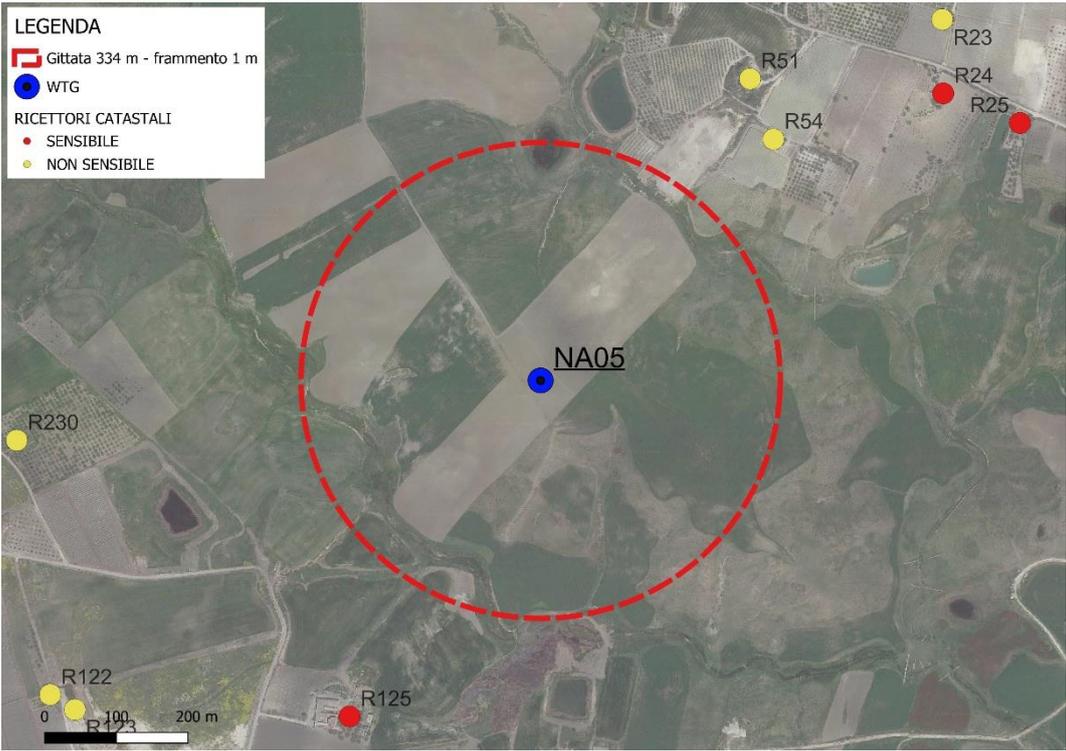


Figura 9. Analisi dei ricettori per la turbina NA05

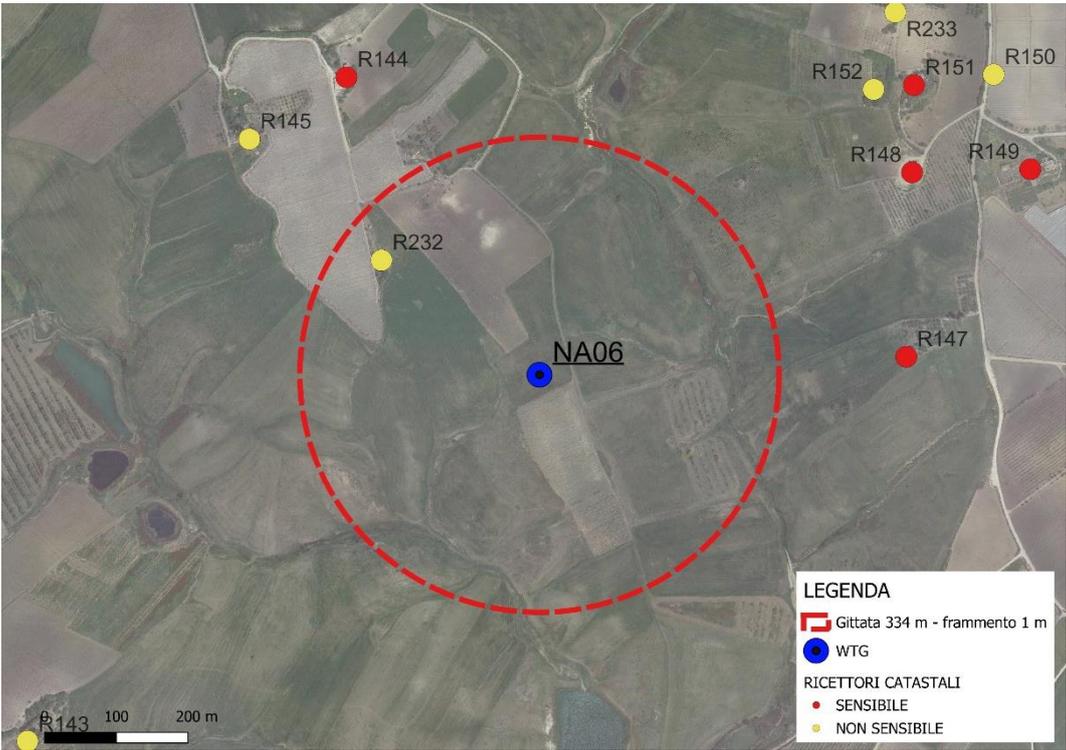


Figura 10. Analisi dei ricettori per la turbina NA06

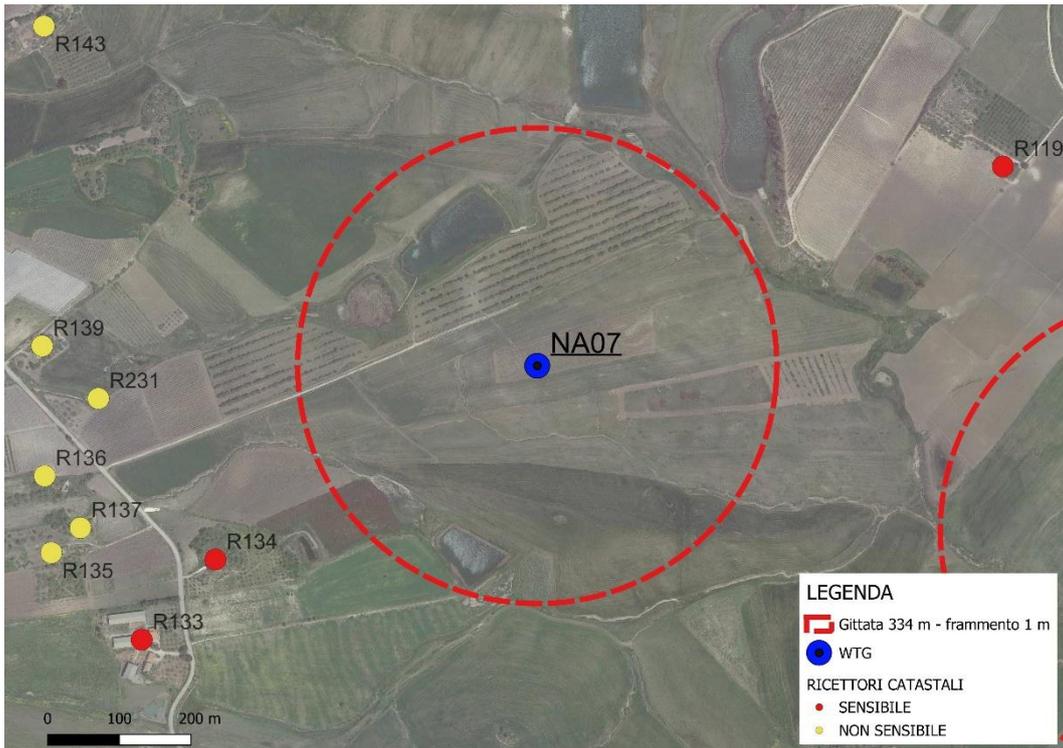


Figura 11. Analisi dei ricettori per la turbina NA07

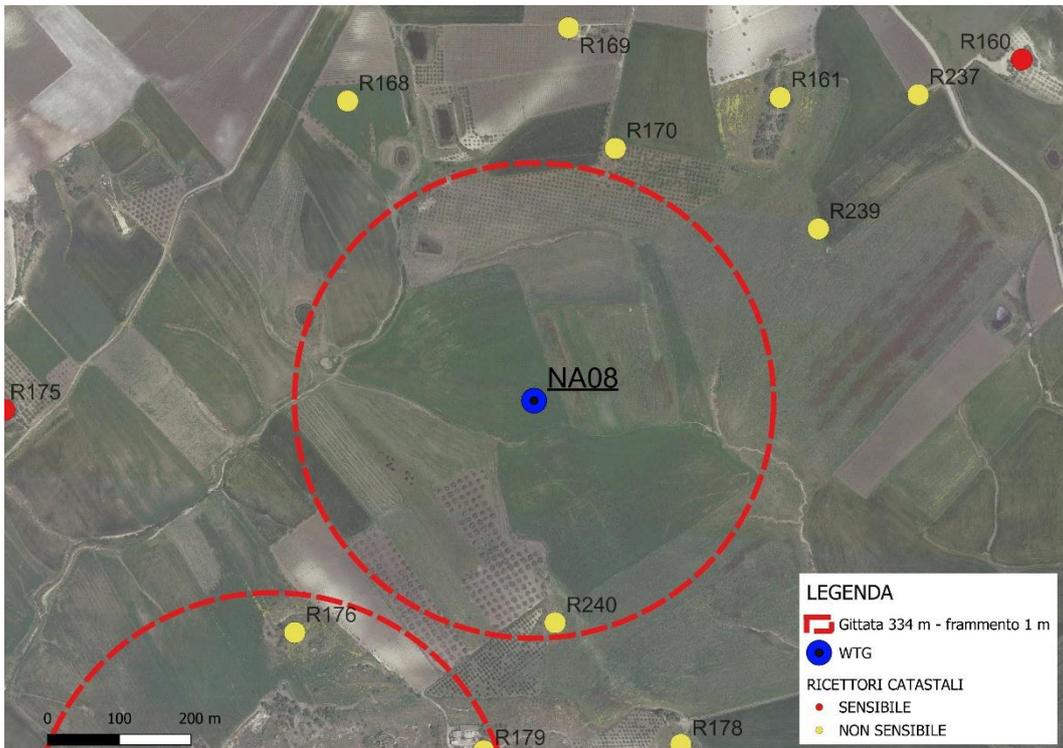


Figura 12. Analisi dei ricettori per la turbina NA08

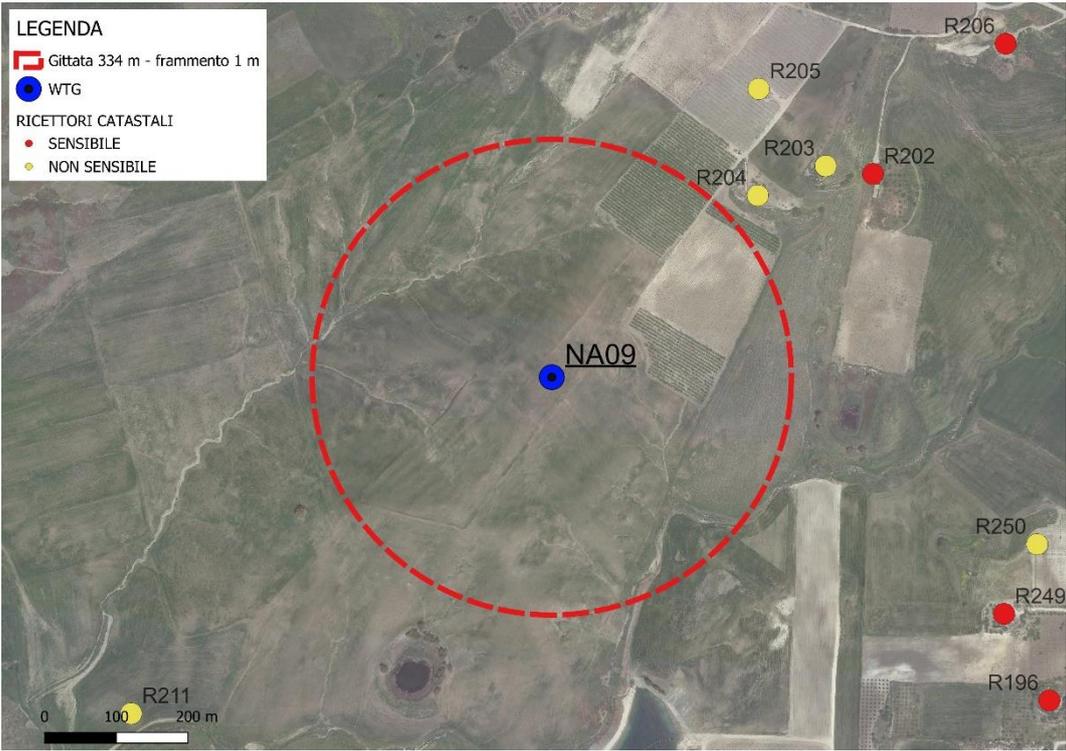


Figura 13. Analisi dei ricettori per la turbina NA09

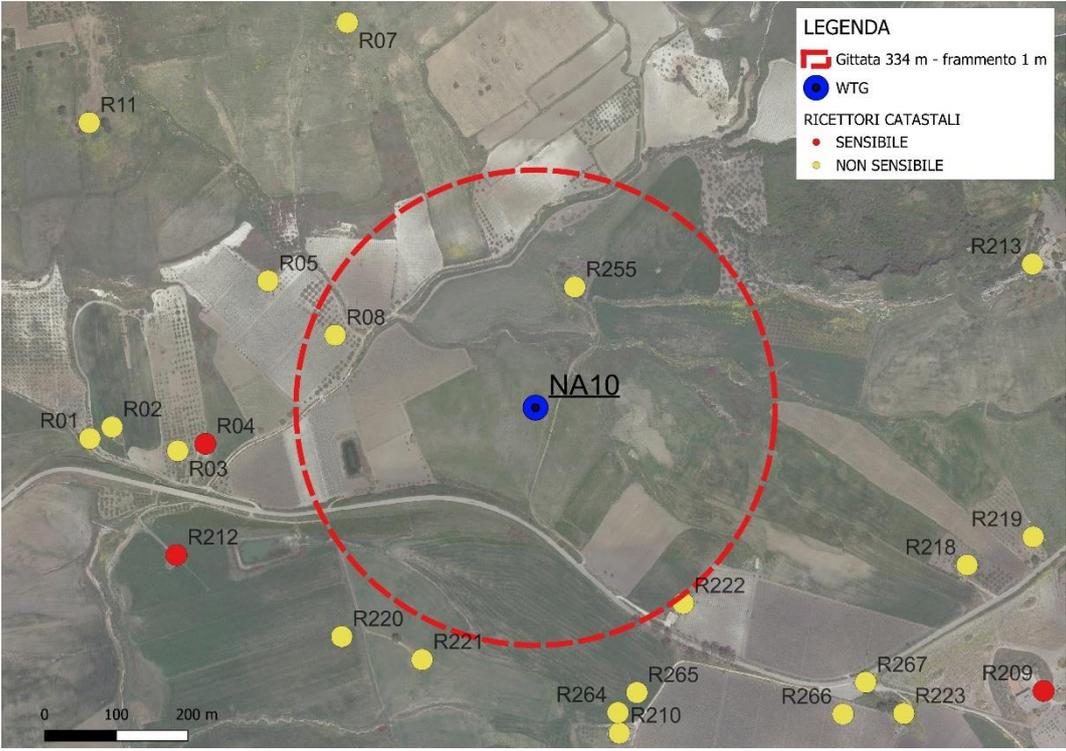


Figura 14. Analisi dei ricettori per la turbina NA10

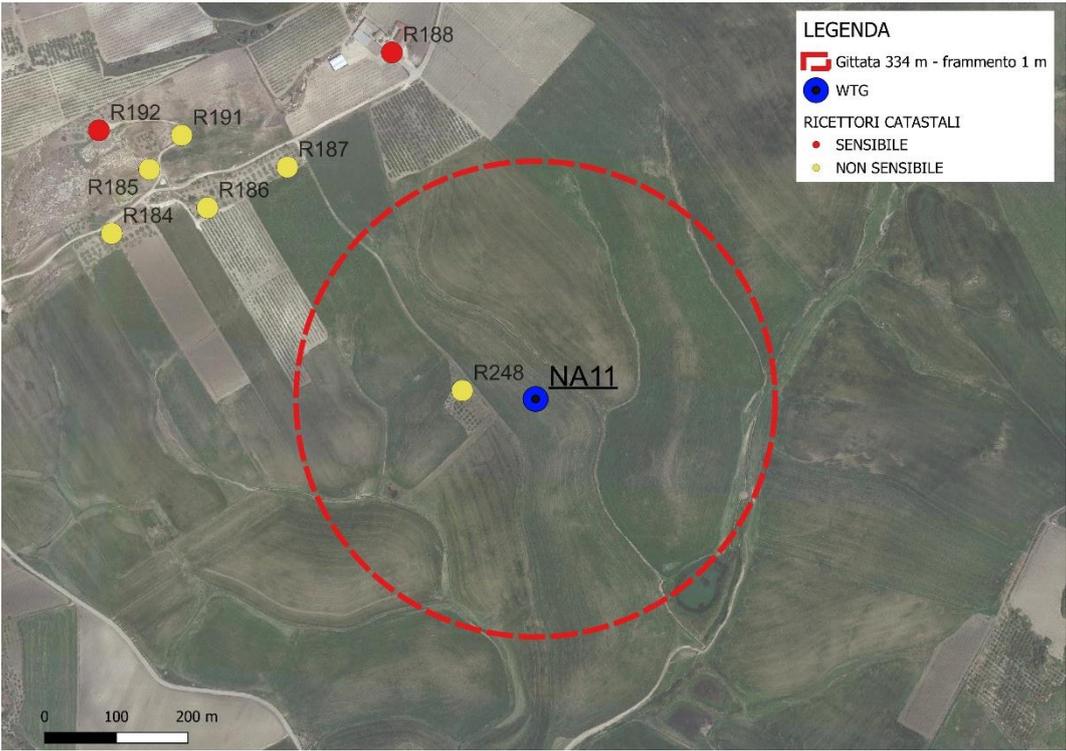


Figura 15. Analisi dei ricettori per la turbina NA11

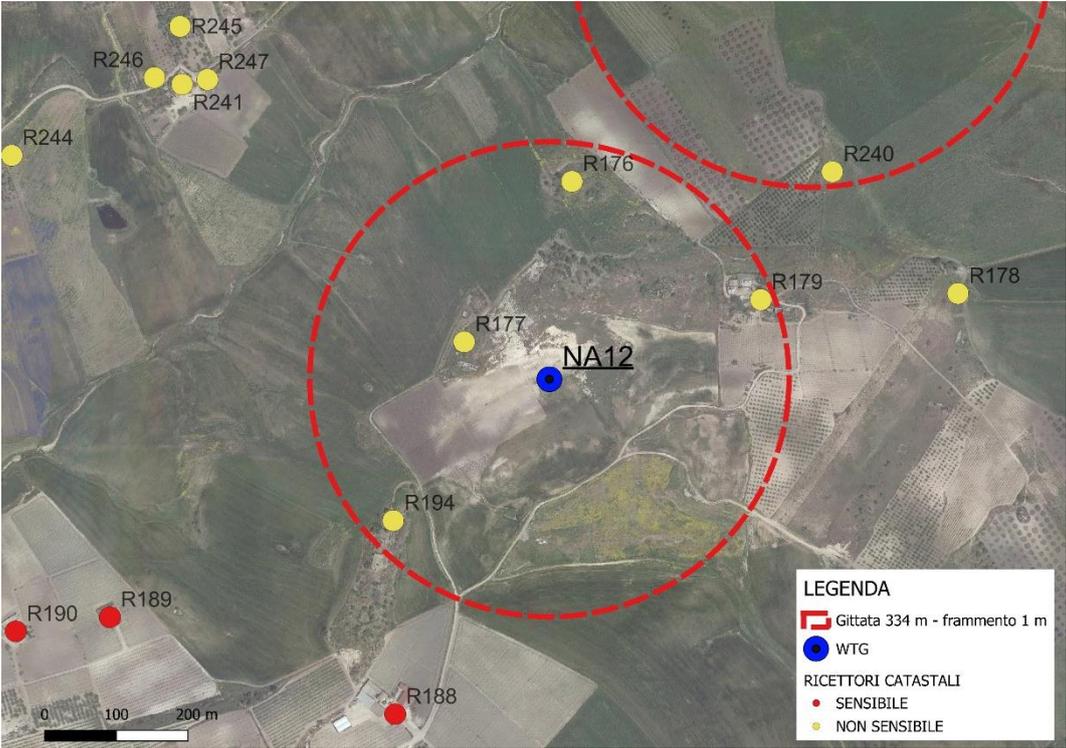


Figura 16. Analisi dei ricettori per la turbina NA12

Le interferenze rilevate riguardano i seguenti aerogeneratori:

- **N06:** interferenze con il ricettore R232.
- **N08:** interferenze con i ricettori R240;

 Sirio Rinnovabili Srl Largo Augusto n.3 20122 Milano pec:siriorinnovabili@legalmail.it	STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI		Cod. AS314-SIA12-R	
			Data Ottobre 2023	Rev. 00

- **N10:** interferenze con i ricettori R08 e R255;
- **N11:** interferenze con il ricettore R248;
- **N12:** interferenze con i ricettori R176, R177, R179 e R194.

Tutti i ricettori che ricadono nei buffer di 334 m dalle turbine risultano essere tutti non sensibili, per cui non è prevista presenza stabile di persone per almeno 4 ore al giorno (vedi elaborato progettuale "AS314-SIA08-D_SCHEDE REPORT DEI FABBRICATI E RICETTORI NELL'AREA DI STUDIO").

3 PROBABILITA' DI ACCADIMENTO

Il processo di rottura di un aerogeneratore è un evento raro, risultato di una catena di eventi, la cui probabilità totale è data dalla combinazione delle probabilità dei meccanismi intermedi, attraverso i quali si giunge al risultato finale. Ogni evento individuale della catena è visto con le sue conseguenze in modo che il prodotto della probabilità di occasione di ogni individuale evento fornisce la relativa probabilità di danno. Questo valore può essere messo in relazione con il valore di soglia, che dipende dall'oggetto individuale 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 occasione dell'evento incidentale accaduto alla turbina eolica;
- P_2 è la probabilità di occasione dell'urto tra l'oggetto da proteggere e la pala;
- P_3 è la probabilità di occasione della condizione di vento sfavorevole o dei condizionamenti ambientali;
- P_4 la probabilità di occasione relativa ad altre cause, come tolleranze di costruzione, etc.

In conclusione, in relazione al rischio di rottura, si riportano le risultanze del documento "Analysis Of RiskInvolved 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 probabilità di rottura di un frammento di pala sia pari a circa 0,00026%:

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 3. Probabilità di rottura aerogeneratore e massima gittata riportata e confermata

La probabilità 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. È certo sulla base dell'esperienza e di semplici considerazioni fisiche (conservazione della quantità di moto) che trattasi 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), 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.