

REGIONE SARDEGNA

Provincia di Sassari

COMUNE DI CALANGIANUS



REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROL.	APPROV.
01	EMISSIONE PER ENTI ESTERNI	10/05/2024	FURNO C.	BELFIORE G.	FURNO C.
00	EMISSIONE PER COMMENTI	12/04/2024	FURNO C.	BELFIORE G.	FURNO C.

Committente:		 <p>AEI WIND PROJECT XVI S.R.L. P.I. 17264911003 Via Savoia 78 00198 Roma</p>			
Società di Progettazione:		Ingegneria & Innovazione		Progettista/Resp. Tecnico:	
 <p>Via Jonica, 16 – Loc. Belvedere 96100 Siracusa (SR) Tel. 0931.1663409 Web: www.antexgroup.it e-mail: info@antexgroup.it</p>				Dott. Ing. Cesare Furno Ordine degli Ingegneri della Provincia di Catania n° 6130 sez. A	
Progetto:					
IMPIANTO EOLICO TEMPIO II					
Tavola:					
RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI					
Scala:	Nome DIS/FILE:	Allegato:	F.to:	Livello:	
—:—	C23046S05-VA-RT-08-01	1/1	A4	DEFINITIVO	
Il presente documento è di proprietà della ANTE GROUP S.r.l. È vietato la comunicazione a terzi o la riproduzione senza il permesso scritto della suddetta. La società tutela i propri diritti a rigore di Legge.					
				  	

INDICE

1.	PREMESSA.....	3
2.	ROTTURA ELEMENTI ROTANTI E CALCOLO DELLA RELATIVA GITTATA	4
2.1.	Forze agenti sulla traiettoria	6
2.2.	Rottura della pala alla radice e calcolo gittata nel “Worst Case”	6
6.3	Il caso studio e considerazioni nel Real Case.....	22
6.4	Probabilità di accadimento	27
3.	CONCLUSIONI	29

 <p>AEI WIND PROJECT XVI S.R.L. P.I. 17264911003 Via Savoia 78 00198 Roma</p>	<p>IMPIANTO EOLICO TEMPIO II</p> <p>RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI</p>		 <p>Ingegneria & Innovazione</p>
	10/05/2024	REV: 1	

1. PREMESSA

Per conto della società proponente, AEI WIND PROJECT XVI S.R.L., società soggetta all'attività di direzione e coordinamento di ABEI ENERGY & INFRASTRUCTURE S.L., dedicata allo sviluppo, realizzazione e gestione per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, la società Antex Group S.r.l. ha redatto il progetto definitivo relativo alla realizzazione di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica, denominato Impianto eolico "Tempio II" da realizzarsi nel territorio del Comune di Calangianus, appartenente alla provincia di Sassari. Il progetto prevede l'installazione di n. 6 aerogeneratori da 6,6 MW ciascuno, per una potenza complessiva pari a 39,6 MW. Tutta l'energia elettrica prodotta verrà ceduta alla rete elettrica nazionale tramite la posa di un cavidotto interrato su strade esistenti e la realizzazione di una nuova cabina utente per la consegna collegata in antenna a 36 kV sulla nuova Stazione Elettrica (SE) di Smistamento della RTN a 150 kV in GIS denominata "Tempio" (prevista dal Piano di sviluppo Terna) da collegare, tramite due nuovi elettrodotti a 150 kV, a una nuova Stazione Elettrica di Trasformazione della RTN a 380/150 kV da collegare tramite un elettrodotto 380 kV al futuro ampliamento della Stazione Elettrica di Trasformazione della RTN di Codrongianos.

Le attività di progettazione definitiva e di studio di impatto ambientale sono state sviluppate dalla società di ingegneria Antex Group Srl. Antex Group Srl è una società che fornisce servizi globali di consulenza e management ad Aziende private ed Enti pubblici che intendono realizzare opere ed investimenti su scala nazionale ed internazionale.

Antex Group pone a fondamento delle proprie attività, quale elemento essenziale della propria esistenza come unità economica organizzata ed a garanzia di un futuro sviluppo, i principi della qualità, come espressi dalle norme ISO 9001, ISO 14001 e OHSAS 18001 nelle loro ultime edizioni.

*Il presente documento è di proprietà della ANTEX GROUP srl.
È Vietato la comunicazione a terzi o la riproduzione senza il permesso scritto della suddetta.
La società tutela i propri diritti a rigore di Legge.*

Comm.: C23-046-S05

ISO 9001
BUREAU VERITAS
Certification



 <p>AEI WIND PROJECT XVI S.R.L. P.I. 17264911003 Via Savoia 78 00198 Roma</p>	<p>IMPIANTO EOLICO TEMPIO II</p> <p>RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI</p>		 <p>Ingegneria & Innovazione</p>
	10/05/2024	REV: 1	

2. ROTTURA ELEMENTI ROTANTI E CALCOLO DELLA RELATIVA GITTATA

La presenza e l'esercizio di un parco eolico, come di qualunque altra attività di produzione industriale, è inevitabilmente connessa alla probabilità di rischi per le persone o le cose che si trovano nelle sue immediate vicinanze.

Lo scopo dei vari studi che concorrono al progetto sarebbe quello di ridurre i danni, causati da incidenti derivanti da tali installazioni, sino ad un rischio residuale non eliminabile ma che si possa considerare accettabile. Nelle considerazioni entrerebbero sostanzialmente, se non esclusivamente, i requisiti di sicurezza che l'impianto deve assicurare in tutte le fasi della propria vita.

Per raggiungere tale scopo bisogna prima individuare le cause che potrebbero innescare eventuali incidenti. Come ampiamente descritto dagli studi di settore, nel caso di un impianto eolico, le cause che influiscono maggiormente sulla probabilità di incidenti sono imputabili ad eventi naturali di straordinaria entità, più raramente ad errore umano; quindi, bisogna contestualizzare l'analisi alle peculiarità meteorologiche della zona di impianto.

Inoltre, la *perdita di integrità strutturale* per rotture (di pale, di torre, etc.) in un aerogeneratore può essere ingenerata da

- *carenze interne* alla macchina per mancato od insufficiente controllo o regolazione dei regimi di funzionamento del rotore durante temporali o tempeste di vento più o meno vigorose;
- *eventi esterni*, come fulminazioni o eccessivi carichi eolici, che quasi sempre si manifestano in concomitanza di condizioni meteorologiche complesse, molto forti o addirittura eccezionali, pur con i sistemi di controllo e di sicurezza dell'unità perfettamente operativi.

Quindi, alla luce di quanto scritto, si può affermare che la tipologia di incidente più di nostro interesse è senza dubbio la rottura degli elementi rotanti come il distacco di un'intera pala il quale verrà analizzato nel dettaglio.

La seguente analisi scaturisce dai potenziali rischi dovuti alla presenza di componenti di grandi dimensioni in movimento e consiste nello stimare la distanza dall'aerogeneratore entro la quale, in presenza di un'eventuale rottura degli elementi rotanti, un distacco con lancio di una pala possa rappresentare un rischio. Queste possono essere strappate dalla loro sede e lanciate con una quantità di moto abbastanza elevata da raggiungere distanze abbastanza importanti. La traiettoria dipende dall'energia cinetica iniziale al momento del rilascio, dalle condizioni anemologiche, dalle proprietà aerodinamiche dell'elemento e dalla sue dimensioni e dal punto della circonferenza di rotazione da cui si stacca, oltre dall'altezza della torre e dalla potenza della macchina eolica. Nella trattazione che segue si adopereranno delle semplificazioni come, ad esempio, considerare all'interno del calcolo il contributo degli effetti gravitazionali ed escludere, invece, i contributi aerodinamici. Tener conto di questi ultimi significherebbe considerare un numero significativo di variabili come, tra le tante, la pala che viene lanciata sia in termini di massa sia in termini di contributi aerodinamici oltre a dover fissare le condizioni di vento all'atto della rottura, alla distribuzione delle velocità lungo il pezzo staccato e la distribuzione delle velocità del vento lungo la traiettoria. È vero che i contributi aerodinamici potrebbero aumentare il tempo di volo e quindi la gittata ma è anche vero che, per compensare, non verrà tenuto conto della presenza dell'aria che genera comunque delle forze di resistenza viscoso che agendo sulla superficie della pala ne riducono tempo di volo e

*Il presente documento è di proprietà della ANTEX GROUP srl.
È vietato la comunicazione a terzi o la riproduzione senza il permesso scritto della suddetta.
La società tutela i propri diritti a rigore di Legge.*

Comm.: C23-046-S05

ISO 9001
BUREAU VERITAS
Certification



distanza. Inoltre, queste ipotesi risultano conservative considerando che in letteratura si registra, a causa degli effetti di attrito, una diminuzione del tempo di volo anche del 20% (“Blade throw calculation under normal operating conditions” VESTAS AS Denmark July 2001), ponendoci in una situazione di maggiore sicurezza.

Le pale di un aerogeneratore sono fissate al mozzo e vi è un sistema di controllo che ne modifica costantemente l’orientamento rispetto alla direzione del vento, per offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo, indipendentemente dalla direzione del vento, un solo verso di rotazione.

La tipologia di macchina di riferimento per il nostro calcolo avrà le seguenti caratteristiche:

Altezza al Mozzo	155 m
Diametro Rotore	170 m
Lunghezza singola Pala	83,5 m
Area Spazzata	22.698 m ²
Numero Pale	3
Senso di Rotazione	Orario
Velocità di Rotazione Nominale del Rotore	8,8 rpm
Potenza Nominale Turbina	6,6 MW
Cut-Out	25 m/s
Cut-in	3 m/s
Posizione Baricentro della pala a partire dalla radice	27,83 m

Le modalità di rottura della pala possono essere assai diverse. Essendo un organo in rotazione è soggetto alla forza centripeta che va equilibrata con l’azione della struttura della torre stessa. Per minimizzare tale forza, la pala è costruita in materiale leggero; normalmente si utilizzano materiali compositi che sfruttano le caratteristiche meccaniche così da far fronte ai carichi aerodinamici imposti.

Le modalità di rottura che più frequentemente si potrebbe venire a verificarsi è del tipo “Rottura alla Radice”.

2.1. Forze agenti sulla traiettoria

La determinazione delle forze e dei momenti agenti sulla pala a causa di una rottura istantanea durante il moto rotazionale, come detto precedentemente, è molto complessa.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate inerziali agenti sulla pala. La pala quindi, quando inizierà il suo moto, continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto).

L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità. La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano. La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco. Non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore si avrebbe nel caso di distacco in corrispondenza della posizione a 45 gradi e di moto "a giavellotto" del frammento. Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di queste condizioni è praticamente impossibile: le forze di resistenza viscosa, le azioni del vento ed il moto di rotazione complesso dovuto al profilo aerodinamico della pala, si oppongono al moto riducendone tempo e distanza di volo.

2.2. Rottura della pala alla radice e calcolo gittata nel "Worst Case"

Questo tipo di incidente, che comporta il distacco di una pala completa dal rotore dell'aerogeneratore, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala ed in mozzo.

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente compiti di forma. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.

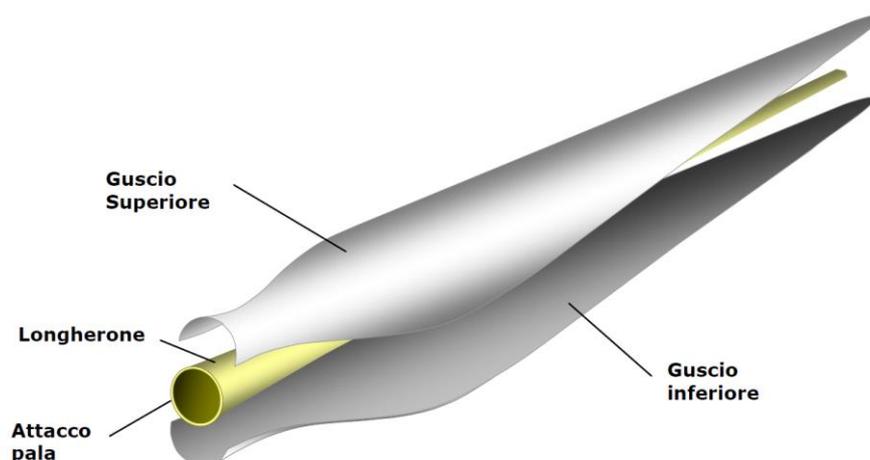


Figura 1 Stratificazione della struttura di una pala



Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai carichi di fatica, per questo motivo è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina. L'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono determinare la rottura per fatica dei bulloni e al distacco della pala.

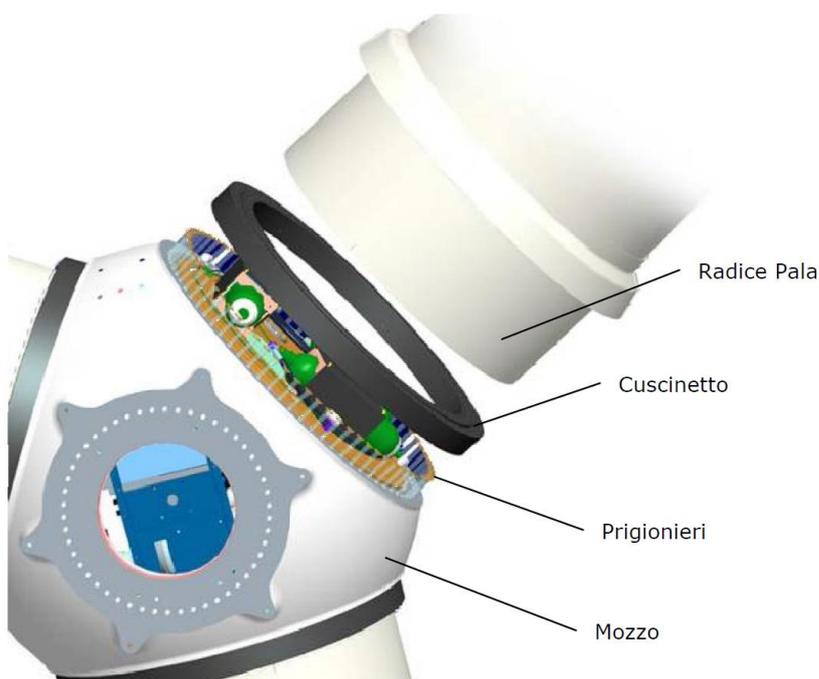




Figura 2 Collegamento pala-mozzo

Per la stima della gittata massima dell'intera pala si impongono alcune ipotesi semplificative:

- distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;
- assenza di attriti viscosi durante il volo;
- distacco alla rotazione massima di funzionamento;
- vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
- assenza di effetti di "portanza" del profilo alare.

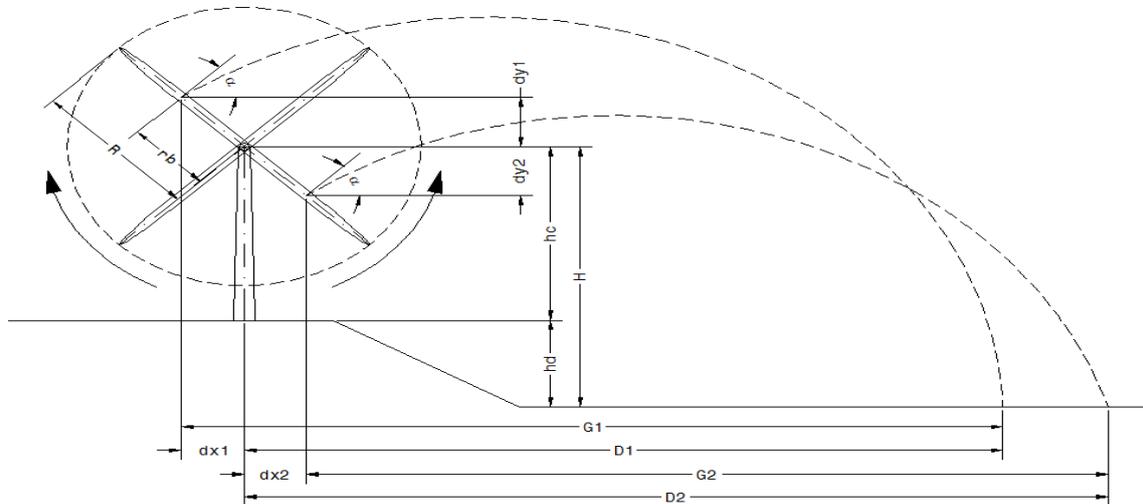


Figura 3 Schema grafico di gittata

Il moto considerato è di tipo rotazionale, cioè quello fisicamente più probabile. Non viene considerata la possibilità, puramente teorica, che il corpo assuma una traiettoria “a giavellotto”.

Inoltre, ponendosi nelle condizioni peggiori possibili (WORST CASE) e come precedentemente illustrato, viene trascurata la presenza dell’aria che nella realtà genera forze di resistenza al moto che ne ridurrebbero tempo di volo e distanza di caduta.

$$\left\{ \begin{array}{l} z = -g \text{ nella direzione verticale} \\ x = 0 \text{ nella direzione orizzontale} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} z = h + vt \sin \alpha - \frac{1}{2} gt^2 \\ x = vt \cos \alpha \end{array} \right.$$

Il corpo tocca terra per $z=0$ per cui risulta:

$$h + vt \sin \alpha - \frac{1}{2} gt^2 = 0$$

La soluzione dell’equazione di secondo grado per tempi positivi è:

$$t = \frac{1}{g} \left(v \sin \alpha + \sqrt{v^2 \sin^2 \alpha + 2gh} \right)$$

Pertanto, quando il corpo raggiunge terra è:

$$x = \frac{v}{g} \cos \alpha \left(v \sin \alpha + \sqrt{v^2 \sin^2 \alpha + 2gh} \right)$$

Ovvero:

$$\frac{x}{h} = \frac{v^2}{2gh} 2 \cos \alpha \sin \alpha \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2gh}{v^2 \sin^2 \alpha}} \right)$$

Il valore massimo di x_G (indicato nel grafico precedente con G e rappresentante la massima gittata del baricentro del corpo), dipende dall'angolo di lancio α e bisognerà quindi trovare il massimo della funzione:

$$x_G(\alpha) = \frac{\omega^2 L^2 \sin 2\alpha}{2g} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2g(H + L \cos \alpha)}{\omega^2 L^2 \sin^2 \alpha}} \right] + L \sin \alpha$$

Chiamiamo 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 radianti, per n giri avremo $2\pi n$ radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare ω del corpo in movimento. Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

$$\omega = 2\pi n / 60 \text{ rad/sec}$$

Il baricentro della pala verrà assunto a circa un terzo della lunghezza della pala stessa e cioè a circa 27,83 m a partire dalla radice della stessa, e ad una distanza dal centro di rotazione pari a circa $r_b = 29,33$ m, dovendo aggiungere ulteriori 1,50 m considerando che il diametro dell' Hub è pari a circa 3 m.

Dalle schede tecniche dell'aerogeneratore, fornite dal Committente, si evince che la velocità nominale del rotore a pieno regime è di $n = 8,8$ rpm.

Per determinare la velocità del baricentro della pala basta moltiplicare la distanza del baricentro dal centro di rotazione per la velocità angolare. Per questa velocità angolare, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$v_o = \omega r_b = 2\pi n / 60 r_b = 27,03 \text{ m/sec}$$

posizione e velocità iniziale sono determinati anche dall'angolo α (angolo con l'orizzontale e la normale al moto) della pala al momento del distacco. Sostituendo all'espressione ricavata per T e interpolandola con i diversi valori assunti dall'angolo di lancio α , si ottiene il tempo di volo e il valore massimo di gittata del baricentro del corpo:



t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
0,00	-25,78	168,99
0,07	-24,04	169,91
0,15	-22,30	170,77
0,22	-20,56	171,59
0,29	-18,82	172,35
0,37	-17,08	173,06
0,44	-15,33	173,71
0,51	-13,59	174,31
0,59	-11,85	174,86
0,66	-10,11	175,36
0,73	-8,37	175,80
0,81	-6,63	176,20
0,88	-4,89	176,53
0,95	-3,14	176,82
1,03	-1,40	177,05
1,10	0,34	177,23
1,17	2,08	177,36
1,25	3,82	177,44
1,32	5,56	177,46
1,39	7,30	177,43
1,47	9,04	177,35
1,54	10,79	177,21
1,61	12,53	177,02
1,69	14,27	176,78
1,76	16,01	176,49
1,83	17,75	176,14
1,91	19,49	175,75
1,98	21,23	175,29
2,05	22,98	174,79
2,13	24,72	174,23
2,20	26,46	173,62
2,27	28,20	172,96
2,35	29,94	172,25
2,42	31,68	171,48
2,49	33,42	170,66

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
0,00	27,81	145,66
0,06	29,45	146,19
0,13	31,08	146,68
0,19	32,72	147,13
0,26	34,36	147,54
0,32	36,00	147,91
0,38	37,64	148,24
0,45	39,28	148,53
0,51	40,92	148,78
0,58	42,56	148,99
0,64	44,20	149,16
0,70	45,84	149,29
0,77	47,48	149,38
0,83	49,12	149,43
0,90	50,76	149,43
0,96	52,39	149,40
1,02	54,03	149,33
1,09	55,67	149,22
1,15	57,31	149,07
1,22	58,95	148,88
1,28	60,59	148,64
1,34	62,23	148,37
1,41	63,87	148,06
1,47	65,51	147,71
1,54	67,15	147,31
1,60	68,79	146,88
1,66	70,43	146,41
1,73	72,06	145,89
1,79	73,70	145,34
1,86	75,34	144,75
1,92	76,98	144,11
1,98	78,62	143,44
2,05	80,26	142,73
2,11	81,90	141,97
2,18	83,54	141,18



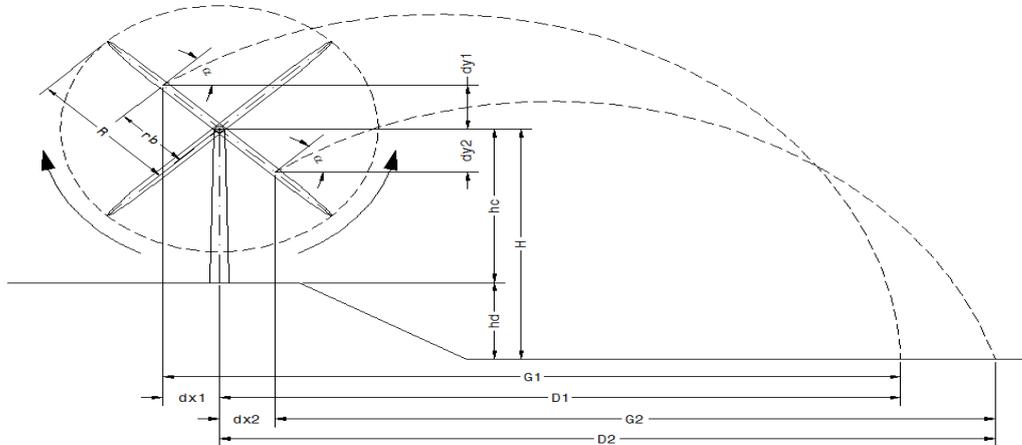
2,57	35,16	169,78
2,64	36,91	168,86
2,71	38,65	167,88
2,79	40,39	166,85
2,86	42,13	165,77
2,93	43,87	164,63
3,00	45,61	163,44
3,08	47,35	162,20
3,15	49,10	160,90
3,22	50,84	159,56
3,30	52,58	158,16
3,37	54,32	156,70
3,44	56,06	155,20
3,52	57,80	153,64
3,59	59,54	152,03
3,66	61,29	150,36
3,74	63,03	148,65
3,81	64,77	146,88
3,88	66,51	145,06
3,96	68,25	143,18
4,03	69,99	141,26
4,10	71,73	139,28
4,18	73,47	137,24
4,25	75,22	135,16
4,32	76,96	133,02
4,40	78,70	130,83
4,47	80,44	128,59
4,54	82,18	126,29
4,62	83,92	123,94
4,69	85,66	121,54
4,76	87,41	119,09
4,84	89,15	116,58
4,91	90,89	114,02
4,98	92,63	111,41
5,06	94,37	108,74
5,13	96,11	106,03
5,20	97,85	103,26
5,28	99,59	100,43
5,35	101,34	97,56

2,24	85,18	140,34
2,30	86,82	139,47
2,37	88,46	138,55
2,43	90,10	137,60
2,49	91,74	136,61
2,56	93,37	135,57
2,62	95,01	134,49
2,69	96,65	133,38
2,75	98,29	132,22
2,81	99,93	131,03
2,88	101,57	129,79
2,94	103,21	128,52
3,01	104,85	127,20
3,07	106,49	125,84
3,13	108,13	124,45
3,20	109,77	123,01
3,26	111,41	121,53
3,33	113,05	120,02
3,39	114,68	118,46
3,45	116,32	116,86
3,52	117,96	115,23
3,58	119,60	113,55
3,65	121,24	111,83
3,71	122,88	110,07
3,77	124,52	108,28
3,84	126,16	106,44
3,90	127,80	104,56
3,97	129,44	102,64
4,03	131,08	100,68
4,09	132,72	98,69
4,16	134,36	96,65
4,22	135,99	94,57
4,29	137,63	92,45
4,35	139,27	90,29
4,41	140,91	88,09
4,48	142,55	85,85
4,54	144,19	83,57
4,61	145,83	81,25
4,67	147,47	78,89



5,42	103,08	94,63
5,50	104,82	91,65
5,57	106,56	88,62
5,64	108,30	85,53
5,72	110,04	82,39
5,79	111,78	79,20
5,86	113,53	75,95
5,94	115,27	72,66
6,01	117,01	69,31
6,08	118,75	65,90
6,16	120,49	62,45
6,23	122,23	58,94
6,30	123,97	55,38
6,38	125,72	51,77
6,45	127,46	48,10
6,52	129,20	44,38
6,60	130,94	40,61
6,67	132,68	36,79
6,74	134,42	32,91
6,82	136,16	28,98
6,89	137,90	25,00
6,96	139,65	20,96
7,04	141,39	16,88
7,11	143,13	12,74
7,18	144,87	8,54
7,26	146,61	4,30
7,33	148,35	0,00

4,73	149,11	76,49
4,80	150,75	74,05
4,86	152,39	71,57
4,93	154,03	69,05
4,99	155,67	66,49
5,05	157,30	63,89
5,12	158,94	61,25
5,18	160,58	58,57
5,25	162,22	55,85
5,31	163,86	53,08
5,37	165,50	50,28
5,44	167,14	47,44
5,50	168,78	44,56
5,57	170,42	41,64
5,63	172,06	38,68
5,69	173,70	35,67
5,76	175,34	32,63
5,82	176,97	29,55
5,89	178,61	26,43
5,95	180,25	23,26
6,01	181,89	20,06
6,08	183,53	16,82
6,14	185,17	13,53
6,21	186,81	10,21
6,27	188,45	6,85
6,33	190,09	3,44
6,40	191,73	0,00



g	V. pale	R	rb	hc
[m/s ²]	[giri/min]	[m]	[m]	[m]
9,81	8,80	85,00	29,33	155,00

Vo	H
[m/s]	[m]
27,03	155,00

L. pala	D. rotore
[m]	[m]
83,50	170,00

H + rb	D (SIA)
[m]	[m]
184,33	165,71

α	Vox	Voy	dx1	dy1	H1	t1	G1	D1
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
28,48	23,76	12,89	25,78	13,99	168,99	7,33	174,14	148,35

α	Vox	Voy	dx2	dy2	H2	t2	G2	D2
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
18,57	25,62	8,61	27,81	9,34	145,66	6,40	163,92	191,73

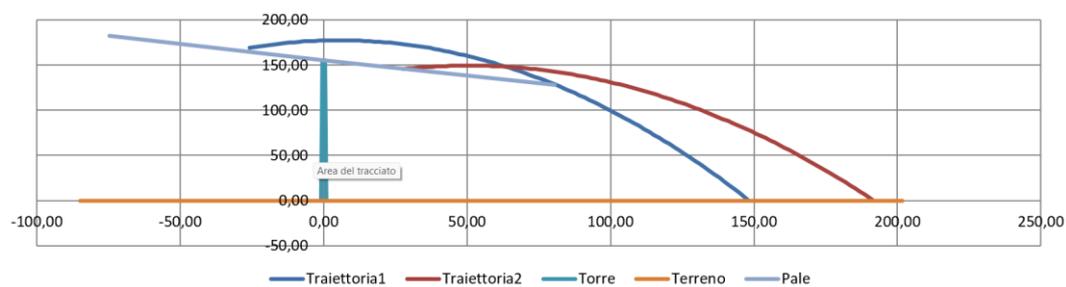


Figura 4 Calcolo della gittata mediante interpolazione dei valori assunti dall'angolo di lancio α in WORST CASE

 <p>AEI WIND PROJECT XVI S.R.L. P.I. 17264911003 Via Savoia 78 00198 Roma</p>	<p>IMPIANTO EOLICO TEMPIO II</p> <p>RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI</p>	 <p>Ingegneria & Innovazione</p>	
		10/05/2024	REV: 1

Come indicato dal grafico e dalle tabelle sopra riportate, il valore massimo che assume la gittata al baricentro è G_1 , pari a 174,14 m, con un angolo di distacco α con l'orizzontale e la normale al moto pari a $28,48^\circ$. Tuttavia, il valore che porta la pala più lontano dall'aerogeneratore è G_2 , pari a 163,92 m, con un angolo di distacco α con l'orizzontale e la normale al moto pari a $18,57^\circ$, poiché, a questo valore bisogna aggiungere la componente orizzontale d_{x2} , che rappresenta la distanza del baricentro dall'asse torre al momento del distacco, pari a 27,50 metri, per ottenere una distanza totale $D2$ pari a 191,73 metri. Nell'ipotesi che la pala, a seguito di rottura accidentale, continui a spostarsi lungo l'asse ortogonale al proprio piano e che arrivi a toccare il suolo con la sua estremità più lunga nel verso del moto, a tale valore dovrà aggiungersi la ulteriore distanza del vertice della pala più distante dal baricentro, quindi i due terzi dalla stessa, e cioè circa 55,67 m. Questo porta ad un valore complessivo della gittata pari a circa **D_{tot} di 247,39 m.**

Per valutare l'accuratezza del calcolo effettuato, si è confrontato il risultato ottenuto con quello estrapolato mediante il foglio di calcolo utilizzato nelle istruttorie per l'eolico della Regione Campania con Decreto Dirigenziale n. 44 del 12/02/2021 in cui è stata data evidenza del foglio di calcolo per la "Gittata massima" utilizzato dalla Unità Operativa Dirigenziale 500203 - Energia, Efficientamento e Risparmio Energetico, Green Economy e Bioeconomia per le istruttorie relative agli impianti di produzione di energia da fonte eolica. Con quest'ultimo viene calcolata una gittata massima in Worst Case di circa 227,41 metri per la stessa tipologia di aerogeneratore, come evidenziato nella tabella di seguito riportata. Quindi, si riscontra un risultato ancora inferiore rispetto al calcolo effettuato precedentemente, che era di 247,39 metri. Questo ci permette di affermare che questa distanza è ancora più in sicurezza in termini di condizioni operative.

*Il presente documento è di proprietà della ANTEX GROUP srl.
È Vietato la comunicazione a terzi o la riproduzione senza il permesso scritto della suddetta.
La società tutela i propri diritti a rigore di Legge.*

Comm.: C23-046-S05

ISO 9001
BUREAU VERITAS
Certification



CALCOLO GITTATA MASSIMA																																																																																							
Il calcolo della Gittata è effettuato in funzione dell'angolo di inclinazione della pala rispetto all'orizzontale, in senso orario e partendo l'angolo di 0° fino a 3° e 4° quadrante																																																																																							
<p>Formula della Gittata Massima per angolo compreso tra 0° e 90°</p> $G = \frac{V_{a0}(V_{a0} + \sqrt{V_{a0}^2 + 2 \cdot g \cdot H_G})}{g} + X_g$ <p>dove: α = Angolo della pala rispetto all'orizzontale (corrisponde all'angolo tra 91° e 180° dell'angolo velocità)</p> <p>$H_G = H_{max} - Y_g$</p> <p>$Y_g = r_g \cdot \sin \alpha$</p> <p>$r_g$ = posizione del baricentro pari ad 1/3 della lunghezza della pala più raggio mozzo $r_g = \frac{D}{2} \cdot L + \frac{L}{3}$</p> <p>$X_g = r_g \cdot \cos \alpha$ posizione del baricentro della pala rispetto all'asse della torre</p> <p>$V_{a0} = v_0 \cdot \cos(90 - \alpha) = v_0 \cdot \sin \alpha$ $v_{a0} = v_0 \cdot \sin(90 - \alpha) = v_0 \cdot \cos \alpha$</p> <p>$v_0 = \omega \cdot r_0 = (2\pi \cdot n \cdot r_0) / 60$ n = numero di giri al minuto del rotore</p>																																																																																							
<p>Gittata Effettiva</p> $G_{eff} = G + I_g$																																																																																							
<p>Schema della Gittata per angolo compreso tra 0° e 90°</p>																																																																																							
<p>Schema della Gittata per angolo compreso tra 270° e 360°</p>																																																																																							
<p>Formula della Gittata Massima per angolo compreso tra 270° e 360°</p> $G = \frac{V_{a0}(V_{a0} + \sqrt{V_{a0}^2 + 2 \cdot g \cdot H_G})}{g} + X_g$ <p>Se non abbiamo posto l'angolo 0° tra il 1° e 4° quadrante in senso orario il segno di v_{a0} e X_g</p> <p>$H_G = H_{max} - Y_g$</p> <p>$Y_g = r_g \cdot \sin(360 - \alpha) = -r_g \cdot \sin \alpha$</p> <p>$r_g$ = posizione del baricentro pari ad 1/3 della lunghezza della pala più raggio mozzo $r_g = \frac{D}{2} \cdot L + \frac{L}{3}$</p> <p>$X_g = r_g \cdot \cos(360 - \alpha) = r_g \cdot \cos \alpha$ posizione del baricentro della pala rispetto all'asse della torre</p> <p>$v_{a0} = v_0 \cdot \cos(\alpha - 270) = -v_0 \cdot \sin \alpha$ $v_{a0} = v_0 \cdot \sin(\alpha - 270) = v_0 \cdot \cos \alpha$</p> <p>$v_0 = \omega \cdot r_0 = (2\pi \cdot n \cdot r_0) / 60$ n = numero di giri al minuto del rotore v_{a0} negativo perché verso sinistra</p>																																																																																							
<p>Gittata Effettiva</p> $G_{eff} = G - I_g$ <p>G negativo perché verso sinistra</p>																																																																																							
<p>Per un angolo compreso tra 270° e 360° il valore della Gittata sarà negativo perché verso sinistra</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Angolo α</th> <th>n</th> <th>L</th> <th>H_{max}</th> <th>v₀</th> <th>v_{a0}</th> <th>v_{tip}</th> <th>H_G</th> <th>D</th> <th>r_g</th> <th>g</th> <th>Gittata teorica</th> <th>X_g</th> <th>I_g</th> <th>Gittata Effettiva</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>270</td><td>8.80</td><td>83.50</td><td>155.00</td><td>27.03</td><td>-27.03</td><td>0.00</td><td>126.67</td><td>170</td><td>29.33</td><td>9.81</td><td>-136.82</td><td>0.00</td><td>55.67</td><td>-192.49</td></tr> <tr><td>271</td><td>8.80</td><td>83.50</td><td>155.00</td><td>27.03</td><td>-27.03</td><td>0.07</td><td>126.67</td><td>170</td><td>29.33</td><td>9.81</td><td>-136.82</td><td>0.51</td><td>55.67</td><td>-192.80</td></tr> <tr><td>272</td><td>8.80</td><td>83.50</td><td>155.00</td><td>27.03</td><td>-27.02</td><td>0.94</td><td>126.68</td><td>170</td><td>29.33</td><td>9.81</td><td>-136.80</td><td>1.02</td><td>55.67</td><td>-193.06</td></tr> <tr><td>273</td><td>8.80</td><td>83.50</td><td>155.00</td><td>27.03</td><td>-26.99</td><td>1.41</td><td>126.71</td><td>170</td><td>29.33</td><td>9.81</td><td>-136.74</td><td>1.54</td><td>55.67</td><td>-193.31</td></tr> </tbody> </table>													Angolo α	n	L	H _{max}	v ₀	v _{a0}	v _{tip}	H _G	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	I _g	Gittata Effettiva	270	8.80	83.50	155.00	27.03	-27.03	0.00	126.67	170	29.33	9.81	-136.82	0.00	55.67	-192.49	271	8.80	83.50	155.00	27.03	-27.03	0.07	126.67	170	29.33	9.81	-136.82	0.51	55.67	-192.80	272	8.80	83.50	155.00	27.03	-27.02	0.94	126.68	170	29.33	9.81	-136.80	1.02	55.67	-193.06	273	8.80	83.50	155.00	27.03	-26.99	1.41	126.71	170	29.33	9.81	-136.74	1.54	55.67	-193.31
Angolo α	n	L	H _{max}	v ₀	v _{a0}	v _{tip}	H _G	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	I _g	Gittata Effettiva																																																																									
270	8.80	83.50	155.00	27.03	-27.03	0.00	126.67	170	29.33	9.81	-136.82	0.00	55.67	-192.49																																																																									
271	8.80	83.50	155.00	27.03	-27.03	0.07	126.67	170	29.33	9.81	-136.82	0.51	55.67	-192.80																																																																									
272	8.80	83.50	155.00	27.03	-27.02	0.94	126.68	170	29.33	9.81	-136.80	1.02	55.67	-193.06																																																																									
273	8.80	83.50	155.00	27.03	-26.99	1.41	126.71	170	29.33	9.81	-136.74	1.54	55.67	-193.31																																																																									

α	n	L	H _{max}	v ₀	v _{a0}	v _{tip}	H _G	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	I _g	Gittata Effettiva
76	8.80	83.50	155.00	27.03	26.23	6.54	183.46	170	29.33	9.81	171.75	7.10	55.67	227.41
77	8.80	83.50	155.00	27.03	26.34	6.08	183.58	170	29.33	9.81	171.69	6.60	55.67	227.36

Il presente documento è di proprietà della ANTEX GROUP srl.
È Vietato la comunicazione a terzi o la riproduzione senza il permesso scritto della suddetta.
La società tutela i propri diritti a rigore di Legge.

Nello specifico, il presente elaborato ha lo scopo di valutare la possibilità di impatto generato dalla rottura di un elemento rotante di uno dei sei aerogeneratori proposti su eventuali ricettori posti nelle vicinanze.

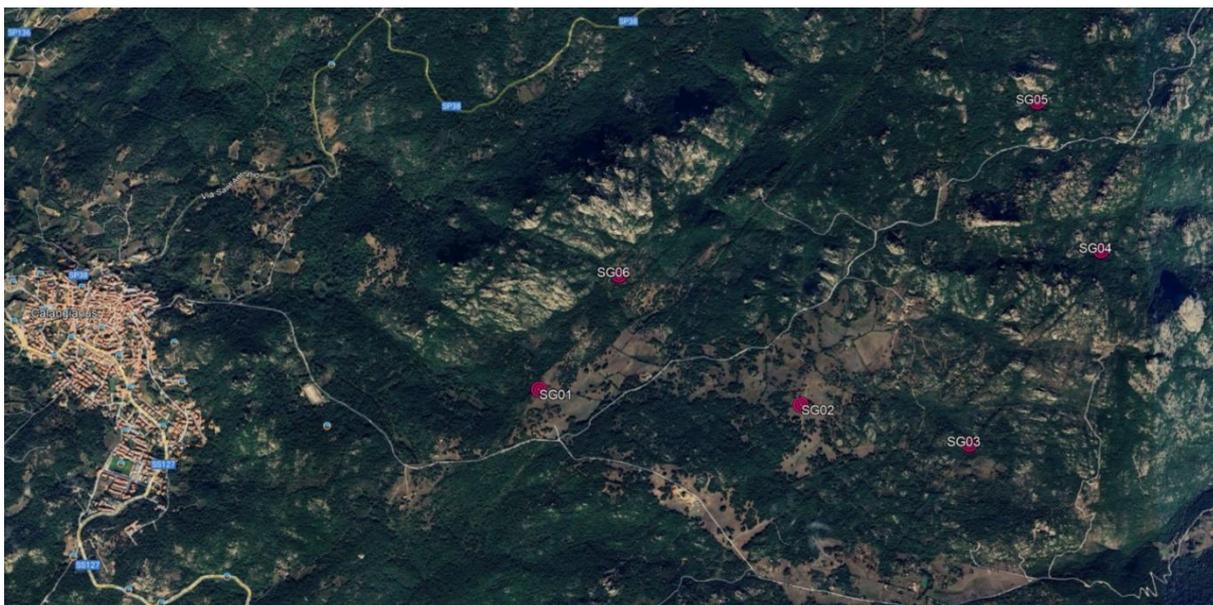


Figura 5 Inquadramento satellitare delle posizioni degli aerogeneratori proposti

La disposizione prevista per i sei aerogeneratori oggetto di studio è riportata nella tabella sottostante in coordinate UTM WGS84.

Tabella 1 Coordinate dei sei aerogeneratori oggetto di studio.

Turbine	Easting	Northing
SG01	518815.70 m E	4529730.34 m N
SG02	520204.00 m E	4529653.00 m N
SG03	521086.00 m E	4529445.00 m N
SG04	521818.00m E	4530485.00 m N
SG05	521512.84 m E	4531320.88 m N
SG06	519232.00 m E	4530350.00 m N

Di seguito si riporta l'elenco dei ricettori regolarmente censiti al Catasto Fabbricati presenti all'interno del buffer di 1500 metri e centro corrispondente ad ogni turbina.



Per ognuno, di loro nella tabella a seguire, sono state indicate le informazioni relative a: ID di riferimento, dati catastali, e buffer di appartenenza

Tabella 2 Elenco ricettori regolarmente censiti nel raggio di circa 1500 m dagli aerogeneratori di progetto

CODICE RICETTORE	COMUNE	MAPPALE	PARTICELLA	CATEGORIA CATASTALE	BUFFER (m)
R9	CALANGIANUS	33	44	A04	1500
R10	CALANGIANUS	33	45	A04	1500
R11	CALANGIANUS	33	84	C02	1500
R12	CALANGIANUS	33	89	F03	1500
R13	CALANGIANUS	33	86	F02	1500
R14	CALANGIANUS	33	96	F02	1500
R15	CALANGIANUS	33	102	C02	1500
R16	CALANGIANUS	33	104	C02	1500
R17	CALANGIANUS	38	164	C02	1500
R18	CALANGIANUS	38	3	FABB DIRUTO	1500
R19	CALANGIANUS	38	36	AREA FAB DM	1500
R20	CALANGIANUS	38	5	FABB RURALE	1500
R21	CALANGIANUS	38	154	A04	1500
R22	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R23	CALANGIANUS	37	115	A02/C02	1500
R24	CALANGIANUS	37	116	A03	1500
R25	CALANGIANUS	37	113	A03	1500
R26	CALANGIANUS	37	100	A04	1500
R27	CALANGIANUS	37	120	D10	1500
R28	CALANGIANUS	37	165	A04	1500
R29	CALANGIANUS	37	17	FABB RURALE	1500
R30	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R31	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R32	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R33	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R34	CALANGIANUS	37	134	A03	1500
R35	CALANGIANUS	37	118	C02	1500
R36	CALANGIANUS	37	155	C02	1500
R37	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R38	CALANGIANUS	37	140	D10	1500
R39	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500



R40	CALANGIANUS	37	62	C06	1500
R41	CALANGIANUS	37	138	A03	1500
R42	CALANGIANUS	32	137	D10	1500
R43	CALANGIANUS	32	136	D10	1500
R44	CALANGIANUS	32	135	D10	1500
R45	CALANGIANUS	32	180	D10	1500
R46	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R47	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R48	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R49	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R50	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R51	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R52	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R53	CALANGIANUS	32	181	C02	1500
R54	CALANGIANUS	32	42	PARTICELLA DIVISA	1500
R55	CALANGIANUS	32	155	D10	1500
R56	CALANGIANUS	47	693	PASCOLO ARB	1500
R57	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R58	CALANGIANUS	47	549	C02	1500
R59	CALANGIANUS	47	548	A04	1500
R60	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R61	CALANGIANUS	47	687	C02	1500
R62	CALANGIANUS	47	568	D10	1500
R63	CALANGIANUS	47	569	A04	1500
R64	CALANGIANUS	47	567	D10	1500
R65	CALANGIANUS	32	133	D01	1500
R66	CALANGIANUS			NON PRESENTE IN MAPPA	1500
R67	CALANGIANUS	32	141	C02/C06	1500
R68	CALANGIANUS	32	140	C06	1500
R69	CALANGIANUS	48	51	C06	1500
R70	CALANGIANUS	37	131	C02	1500
R71	CALANGIANUS	48	55	A03/C02	1500
R72	CALANGIANUS	48	53	A03	1500
R73	CALANGIANUS	49	14	FABB DIRUTO	1500
R74	CALANGIANUS	32	167	A03	1500
R75	CALANGIANUS	32	139	A04	1500
R76	CALANGIANUS	32	157	A04	1500
R77	CALANGIANUS	32	176	Soppressa	1500
R78	CALANGIANUS	32	142	A04	1500

R79	CALANGIANUS	32	163	F02	1500
R80	CALANGIANUS	32	14	FABB DIRUTO	1500
R81	CALANGIANUS	32	173	C02	1500
R82	CALANGIANUS	32	175	C02	1500
R83	CALANGIANUS	32	11	AREA FAB DM	1500
R84	CALANGIANUS	33	97	F02	1500
R85	CALANGIANUS	33	63	A04/D10	1500
R86	CALANGIANUS	38	203	D10	1500
R87	CALANGIANUS	31	424	F02	1500
R88	CALANGIANUS	31	423	F02	1500

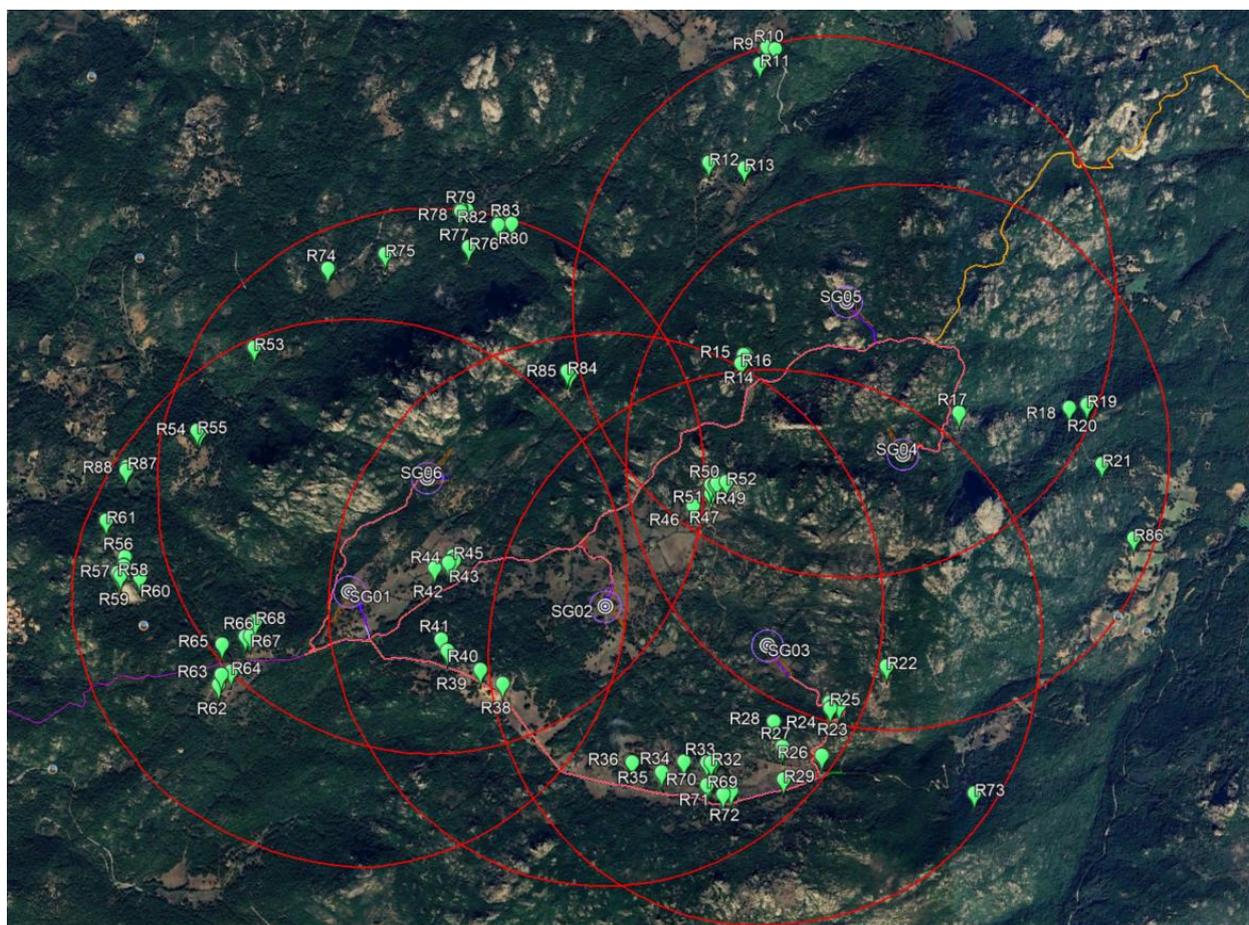


Figura 6 Disposizione dei ricettori (tabella 2) rispetto le Turbine con relativi buffer di 1500 metri

Il valore di gittata massimo in Worst Case, e cioè nelle condizioni peggiorative, calcolato in precedenza è di 247,39, approssimabile in sicurezza a circa 250 m. Se indicassimo tale margine di sicurezza per ogni turbina, come mostrato nell'immagine seguente, noteremmo che nessun ricettore elencato cade all'interno di questo buffer.

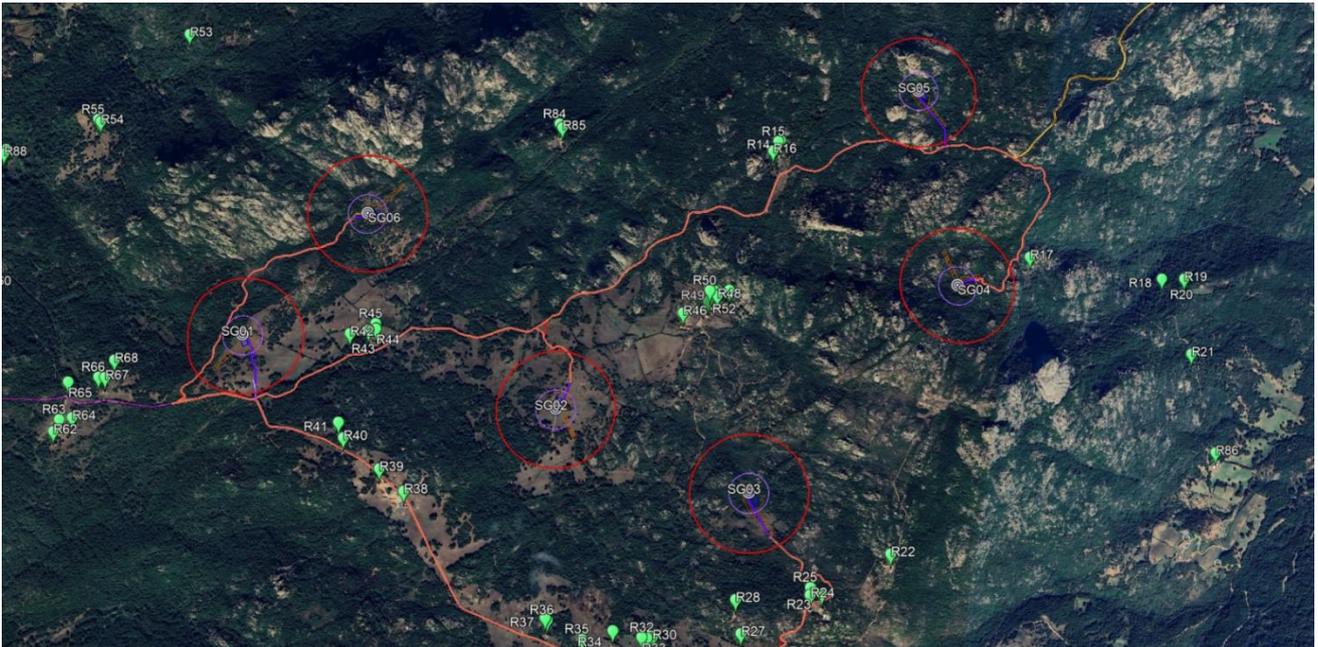


Figura 7 Disposizione dei ricettori (tabella 2) rispetto le Turbine con relativi buffer di 250 metri

Nessun ricettore, tra tutti quelli censiti, ricade all'interno del raggio d'azione dei 250 m per poter essere definito "ricettore sensibile", infatti il più vicino ad un aerogeneratore viene a trovarsi a non meno di 340 m.

6.3 Il caso studio e considerazioni nel Real Case

Lo studio nel Real Case prevede la scelta del ricettore sensibile che presenta quella combinazione di fattori che lo rende più vulnerabile rispetto agli altri come, per esempio, verifica della categoria catastale e accertamento visivo eseguito durante i sopralluoghi per verificarne la presenza umana, vicinanza al relativo aerogeneratore e posizione altimetrica rispetto a quest'ultimo. Nel caso in esame, come visto precedentemente, già nel Worst Case non abbiamo nessun ricettore vulnerabile al fenomeno quindi, a maggior ragione, nel Real Case non si dovrebbe presentare alcuna nuova problematica in quanto, come più volte ricordato, per la stima del valore di gittata in Worst Case, sono state imposte alcune ipotesi semplificative che, come conseguenza, pongono il calcolo nelle condizioni peggiori possibili e cioè:

- distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;
- assenza di attriti viscosi durante il volo;
- distacco alla rotazione di funzionamento massima;
- vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
- assenza di effetti di “portanza” del profilo alare.

Nella realtà il verificarsi di queste condizioni contemporaneamente è sostanzialmente impossibile.

Ma soprattutto il calcolo non ha tenuto conto di un fattore dal quale non si può prescindere: la presenza dell'aria e quindi dell'attrito viscoso tra questa e la pala. Quest'ultima genera comunque delle forze di resistenza viscosi che agendo sulla superficie della pala ne riducono, di conseguenza, tempo di volo e distanza. Come già detto, in letteratura si registra, a causa degli effetti di attrito, una diminuzione del tempo di volo anche del 20% (“Blade throw calculation under normal operating conditions” VESTAS AS Denmark July 2001). A questo abbattimento del valore di gittata massima, quindi, si andrebbero ad aggiungere anche la presenza o meno degli ulteriori fattori precedentemente descritti che ne ridurrebbero ulteriormente il valore. Ma proprio per la natura stocastica di questi ultimi, e per rendere il calcolo quanto più veritiero e in sicurezza possibile, terremo in considerazione solo ed unicamente ciò che sicuramente sarà per ovvie ragioni sempre presente: l'attrito viscoso dovuto all'aria. Inoltre, verrà valutata anche la posizione altimetrica della turbina rispetto al ricettore sensibile.

Quindi, inserendo nel calcolo questa ulteriore variabile, l'attrito viscoso dell'aria γ , otterremo risultati sicuramente più prossimi alla realtà.



t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
0,00	-25,78	168,99
0,06	-24,23	168,10
0,11	-22,70	167,20
0,17	-21,18	166,27
0,22	-19,67	165,32
0,28	-18,18	164,34
0,33	-16,70	163,35
0,39	-15,24	162,34
0,44	-13,79	161,31
0,50	-12,35	160,25
0,55	-10,93	159,18
0,61	-9,52	158,09
0,66	-8,12	156,97
0,72	-6,74	155,84
0,77	-5,37	154,69
0,83	-4,01	153,52
0,88	-2,67	152,33
0,94	-1,33	151,12
1,00	-0,01	149,89
1,05	1,29	148,65
1,11	2,59	147,39
1,16	3,87	146,10
1,22	5,14	144,80
1,27	6,40	143,49
1,33	7,65	142,15
1,38	8,89	140,80
1,44	10,11	139,43
1,49	11,32	138,05
1,55	12,53	136,64
1,60	13,72	135,22
1,66	14,89	133,79
1,71	16,06	132,33
1,77	17,22	130,87
1,82	18,37	129,38
1,88	19,50	127,88
1,94	20,63	126,36
1,99	21,74	124,83

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
0,00	27,81	145,66
0,05	28,83	144,85
0,10	29,85	144,03
0,15	30,86	143,19
0,20	31,86	142,34
0,25	32,85	141,47
0,30	33,83	140,58
0,34	34,81	139,68
0,39	35,77	138,75
0,44	36,73	137,82
0,49	37,68	136,87
0,54	38,63	135,90
0,59	39,56	134,91
0,64	40,49	133,91
0,69	41,41	132,90
0,74	42,32	131,87
0,79	43,22	130,82
0,84	44,12	129,76
0,89	45,01	128,69
0,94	45,89	127,60
0,99	46,77	126,50
1,03	47,63	125,38
1,08	48,49	124,24
1,13	49,34	123,10
1,18	50,19	121,93
1,23	51,03	120,76
1,28	51,86	119,57
1,33	52,69	118,37
1,38	53,50	117,15
1,43	54,31	115,92
1,48	55,12	114,67
1,53	55,92	113,42
1,58	56,71	112,15
1,63	57,49	110,86
1,68	58,27	109,57
1,72	59,04	108,26
1,77	59,80	106,93

X	Y
[m]	[m]
0,00	0,00
-1,00	0,00
-0,50	155,00
0,50	155,00
1,00	0,00
0,00	0,00

X	Y
[m]	[m]
-85,00	0,00
27,81	0,00
27,81	0,00
201,73	0,00

X	Y
[m]	[m]
0,00	155,00
-74,71	182,07
0,00	155,00
80,57	127,93



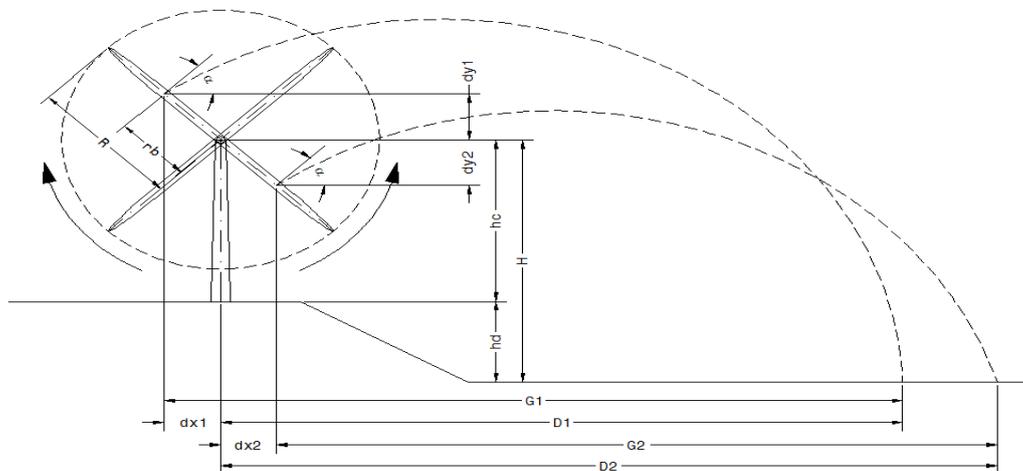
2,05	22,85	123,28
2,10	23,94	121,72
2,16	25,02	120,14
2,21	26,10	118,55
2,27	27,16	116,94
2,32	28,21	115,32
2,38	29,26	113,68
2,43	30,29	112,02
2,49	31,32	110,36
2,54	32,33	108,68
2,60	33,34	106,98
2,65	34,33	105,27
2,71	35,32	103,55
2,76	36,29	101,81
2,82	37,26	100,06
2,88	38,22	98,30
2,93	39,17	96,52
2,99	40,11	94,73
3,04	41,04	92,93
3,10	41,97	91,11
3,15	42,88	89,28
3,21	43,79	87,44
3,26	44,69	85,58
3,32	45,58	83,71
3,37	46,46	81,83
3,43	47,33	79,94
3,48	48,20	78,04
3,54	49,05	76,12
3,59	49,90	74,19
3,65	50,74	72,25
3,70	51,57	70,30
3,76	52,40	68,34
3,82	53,22	66,36
3,87	54,03	64,38
3,93	54,83	62,38
3,98	55,62	60,37
4,04	56,41	58,35
4,09	57,19	56,32
4,15	57,96	54,28

1,82	60,56	105,60
1,87	61,31	104,25
1,92	62,06	102,89
1,97	62,80	101,52
2,02	63,53	100,13
2,07	64,26	98,74
2,12	64,98	97,33
2,17	65,70	95,91
2,22	66,41	94,47
2,27	67,11	93,03
2,32	67,81	91,57
2,36	68,50	90,11
2,41	69,18	88,63
2,46	69,86	87,14
2,51	70,54	85,63
2,56	71,21	84,12
2,61	71,87	82,60
2,66	72,53	81,06
2,71	73,18	79,52
2,76	73,83	77,96
2,81	74,47	76,39
2,86	75,11	74,81
2,91	75,74	73,22
2,96	76,36	71,62
3,01	76,98	70,02
3,05	77,60	68,40
3,10	78,21	66,77
3,15	78,81	65,12
3,20	79,41	63,47
3,25	80,01	61,81
3,30	80,60	60,14
3,35	81,18	58,46
3,40	81,76	56,77
3,45	82,34	55,08
3,50	82,91	53,37
3,55	83,47	51,65
3,60	84,03	49,92
3,65	84,59	48,18
3,70	85,14	46,44



4,20	58,73	52,23
4,26	59,49	50,17
4,31	60,24	48,09
4,37	60,98	46,01
4,42	61,72	43,92
4,48	62,45	41,81
4,53	63,17	39,70
4,59	63,89	37,57
4,64	64,60	35,44
4,70	65,30	33,29
4,76	66,00	31,14
4,81	66,69	28,97
4,87	67,37	26,80
4,92	68,05	24,62
4,98	68,72	22,42
5,03	69,38	20,22
5,09	70,04	18,01
5,14	70,70	15,79
5,20	71,34	13,56
5,25	71,98	11,32
5,31	72,62	9,08
5,36	73,24	6,82
5,42	73,87	4,56
5,47	74,48	2,28
5,53	75,09	0,00

3,74	85,69	44,68
3,79	86,23	42,92
3,84	86,77	41,14
3,89	87,30	39,36
3,94	87,83	37,57
3,99	88,36	35,77
4,04	88,88	33,96
4,09	89,39	32,15
4,14	89,90	30,32
4,19	90,41	28,49
4,24	90,91	26,64
4,29	91,41	24,79
4,34	91,91	22,93
4,38	92,40	21,06
4,43	92,89	19,19
4,48	93,37	17,31
4,53	93,85	15,41
4,58	94,32	13,51
4,63	94,79	11,61
4,68	95,26	9,69
4,73	95,72	7,77
4,78	96,18	5,84
4,83	96,63	3,90
4,88	97,09	1,95
4,93	97,53	0,00



g	V. pale	R	rb	hc	hd
[m/s ²]	[giri/min]	[m]	[m]	[m]	[m]
9,81	8,80	85,00	29,33	155,00	0,00

Vo	H
[m/s]	[m]
27,03	155,00

L. pala	D. rotore
[m]	[m]
83,50	170,00

H + rb	D (SIA)
[m]	[m]
184,33	165,71

Gamma
[Adim]
0,170

α	Vox	Voy	dx1	dy1	H1	t1	G1	D1
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
28,48	23,76	12,89	25,78	13,99	168,99	7,33	174,14	148,35

t1	D1
[s]	[m]
5,53	75,09

α	Vox	Voy	dx2	dy2	H2	t2	G2	D2
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
18,57	25,62	8,61	27,81	9,34	145,66	6,40	163,92	191,73

t2	D2
[s]	[m]
4,93	97,53

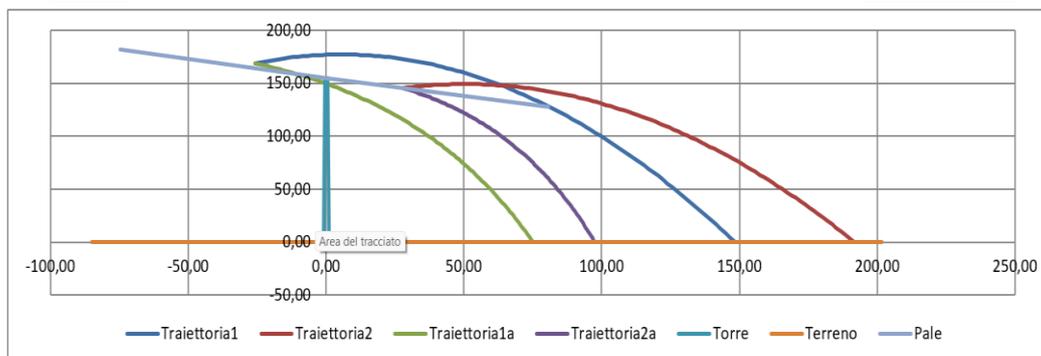


Figura 8 Calcolo della gittata mediante interpolazione dei diversi valori assunti dall'angolo di lancio α in REAL CASE considerando la presenza di attrito viscoso dovuto all'aria

Come si evidenzia dal grafico e dalle tabelle sopra riportate, il valore massimo della gittata, indicato come D_{max} e dovuto anche all'azione di attrito viscoso dell'aria, comporta una riduzione della distanza di gittata di circa il 50%, raggiungendo i 97,53 m. In quest'ultimo caso, e a dimostrazione dell'accuratezza del calcolo, il tempo di volo dovuto al solo attrito si

riduce da 6,40 secondi a 4,93 secondi, una diminuzione di circa il 20%, in linea con quanto descritto in letteratura a causa degli effetti di attrito (“Blade throw calculation under normal operating conditions” VESTAS AS Denmark July 2001). Nel caso in cui una pala, a seguito di una rottura accidentale, continui a muoversi lungo l'asse ortogonale al proprio piano e tocchi il suolo con la sua estremità non nel verso del moto, sarà necessario aggiungere la distanza dal baricentro al vertice della pala, approssimativamente 55,67 metri, per ottenere il valore complessivo della gittata pari a circa **Dtot = 153,20 metri**. Questo valore è ulteriormente al di sotto rispetto a quello calcolato nel caso peggiore e sensibilmente inferiore alla distanza minima effettiva tra l'aerogeneratore e il ricettore, stimata intorno ai 340 metri.

Inoltre, come evidenziato dalla tabella seguente, non vi è alcuna interferenza né con le Strade Provinciali né con le Strade Statali, poiché la più vicina all'impianto si trova a oltre 1 km di distanza."

Tabella 3 Distanze tra gli aerogeneratori e gli assi stradali statali e provinciali più prossimi

AEROGENERATORE	DISTANZA DALL'ASSE STRADALE STATALE O PROVINCIALE (m)	DENOMINAZIONE DELL'ASSE STRADALE
SG 01	1500	SP 38
SG 02	2300	SP 38
SG 03	2600	SS 127
SG 04	2400	SP 38
SG 05	1500	SP 38
SG 06	1100	SP 38

6.4 Probabilità di accadimento

L'aerogeneratore, al pari di tutte le realizzazioni industriali e tecniche, pone all'attenzione dei responsabili una serie di danni potenziali. Per limitarli devono essere formulati criteri, che sarebbe meglio se fossero derivati da prescrizioni o da statuizioni pubbliche e da normative. Ad essi si dovrebbero attenere costruttori e gestori di campi eolici.

Lo scopo sarebbe quello di ridurre i danni, derivanti da tali installazioni, sino ad un rischio residuale tecnico non eliminabile od accettabile. Nelle considerazioni entrerebbero sostanzialmente, se non esclusivamente, i requisiti di sicurezza che l'impianto deve assicurare in tutte le fasi della propria vita (realizzazione, esercizio e dismissione). È ovvio che sono le prime due a farla da padrone. In mancanza di siffatte prescrizioni è prassi riferirsi ad una probabilità di rottura di 1006 eventi all'anno. Il dato numerico va inteso come un limite di soglia da raggiungere o da applicare. È stato per

 <p>AEI WIND PROJECT XVI S.R.L. P.I. 17264911003 Via Savoia 78 00198 Roma</p>	<p>IMPIANTO EOLICO TEMPIO II</p> <p>RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI</p>	 <p>Ingegneria & Innovazione</p>	
		10/05/2024	REV: 1

molto tempo il valore di accettabilità o di credibilità incidentale degli impianti nucleari, che prima di tutti e più di tutti hanno fatto della sicurezza il punto essenziale della loro esistenza. È naturale che se in un dato periodo di tempo, che è solitamente riferito ad un anno, non si verificano eventi incidentali di quel tipo che si sta considerando, la relativa probabilità di rottura assumerà il valore limite che si è appena indicato, cioè 1006 eventi/anno. È ovvio che il valore del danno statistico della rottura di una torre per un convertitore eolico abbia singolarmente una probabilità maggiore. Essendo il processo di rottura della torre il risultato di una catena di eventi, la probabilità totale spettante a tale evento sarà la combinazione delle probabilità dei meccanismi intermedi attraverso i quali si perviene al risultato. 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.

$$P_{so} > P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4$$

nella quale, per le singole quantità, valgono le indicazioni precedenti e precisamente:

- P_{so} è il valore di soglia, che è relativo all'oggetto da difendere e che in linea generale potrebbe essere corrispondente al dato già discusso in precedenza e cioè pari a 1006 o ben maggiore;
- 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 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.

La probabilità di rottura della pala è stata suddivisa in diverse condizioni d'uso:

- alla velocità nominale;
- durante la frenata meccanica;

*Il presente documento è di proprietà della ANTEX GROUP srl.
È vietato la comunicazione a terzi o la riproduzione senza il permesso scritto della suddetta.
La società tutela i propri diritti a rigore di Legge.*

Comm.: C23-046-S05

ISO 9001
BUREAU VERITAS
Certification



- in condizione di overspeed.

I risultati dell'analisi (riportati nella seguente figura) mostrano come la probabilità di rottura di una pala (0.84%) sia inferiore al dato (2,6%) utilizzato più frequentemente in studi di questo genere. Per quanto riguarda la probabilità di rottura in overspeed, è stata utilizzata la stima di studi precedenti, determinata moltiplicando la probabilità di guasto della rete elettrica (5 volte in un anno) con la probabilità di rottura del primo sistema di frenata (10-3 per intervento) e del secondo sistema di frenata (10-3 per intervento) e per la probabilità di rottura della pala in queste condizioni (100%).

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

Frequenza di rottura e massima gittata segnalata

3. CONCLUSIONI

In conclusione, la rottura accidentale di un elemento rotante con conseguente lancio di elementi a distanza dall'aerogeneratore stesso è un evento con una probabilità di accadimento remota ma non impossibile. Nel presente studio, la gittata dell'elemento che potrebbe staccarsi dall'aerogeneratore è stata ipotizzata e calcolata sia nel Worst Case, una condizione estremamente generica e sfavorevole che non rispecchia adeguatamente la realtà dell'evento fisico in oggetto, sia nel Real Case, applicando alcune semplici considerazioni derivate dalla contestualizzazione dell'evento e riportando quindi le ipotesi di calcolo quanto più vicine possibile alla realtà. I risultati, nel peggiore dei casi, hanno posizionato il luogo ipotizzato e sfortunato dell'impatto dell'elemento rotante a circa 247 metri di distanza dall'aerogeneratore, risultando quindi in una distanza ampiamente sicura dal ricettore sensibile o dall'asse stradale statale/provinciale più vicino.

Per quanto riguarda l'eventuale interferenza del fenomeno di gittata con la presenza di eventuali Beni, si è provveduto a individuare tutti i Beni di Repertorio (Paesaggistici, Beni Culturali Archeologici e Architettonici, le proposte di insussistenza vincoli), i Beni da PPR, i Beni Culturali, i Vincoli in Rete VIR, Siti schedati MOSI, Vincoli MIC e Vincoli MIC da VIR. È stato constatato che tutti si trovano a più di 1,5 km di distanza da ciascun aerogeneratore proposto in progetto (come mostrato nell'immagine a seguire). Pertanto, si può affermare che nessun Bene sopra menzionato e la sua fruizione da parte di eventuali utenti siano in qualche modo compromessi dal fenomeno studiato.

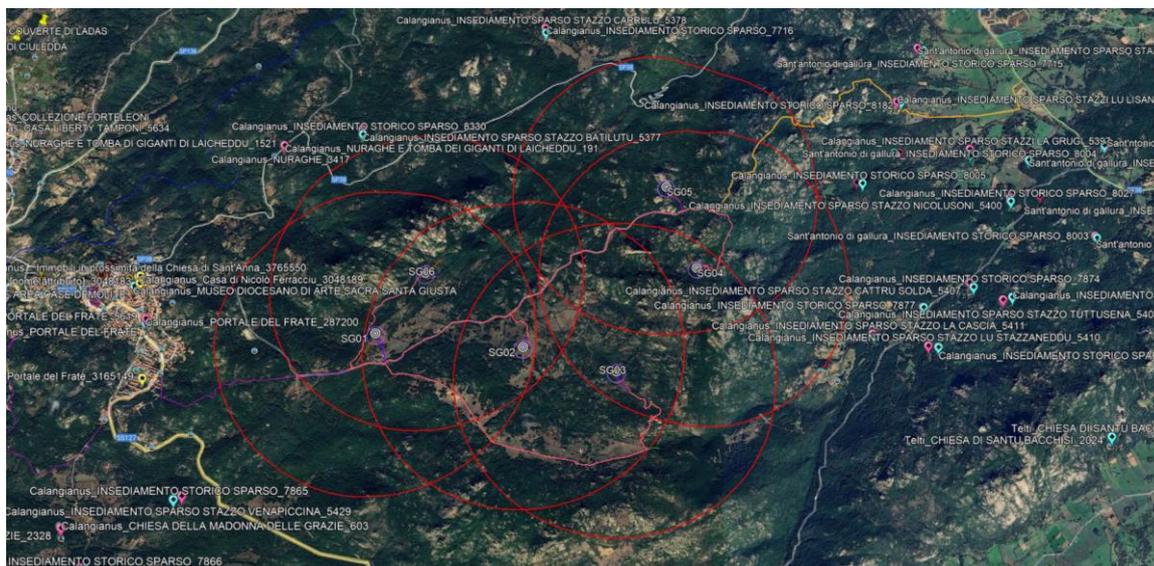


Figura 9 Localizzazione dei Beni, degli aerogeneratori di progetto e relativo buffer di 1,5 km