

REGIONE SARDEGNA

Provincia del Nord-Est Sardegna

COMUNE DI BUDDUSO'



1	EMISSIONE PER ENTI ESTERNI	13/10/21	FURNO C.	FURNO C.	NASTASI A.
0	EMISSIONE PER COMMENTI	24/09/21	FURNO C.	FURNO C.	NASTASI A.
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROL.	APPROV.

Committente:

INFRASTRUTTURE S.p.A.



Via Privata Maria Teresa, 8 – 20123 Milano (MI) Tel.: +39 02 3657 0800
P.IVA: 11513930153; web: www.infrastrutture.eu; PEC: infrastrutture@legalmail.it

Società di Progettazione:

Ingegneria & Innovazione



Via Jonica, 16 – Loc. Belvedere – 96100 Siracusa (SR) Tel. 0931.1663409
Web: www.antexgroup.it e-mail: info@antexgroup.it

PROGETTO:

PARCO EOLICO DI "BUDDUSO"

Progettista/Resp. Tecnico

Dott. Ing. Cesare Furno
Ordine degli Ingegneri
della Provincia di Catania
n° 6130 sez. A

Elaborato:

RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI
POSSIBILI INCIDENTI

Scala:

NA

Nome DIS/FILE:

C20025S05-VA-RT-08-01

Allegato:

1/1

F.to:

A4

Livello:

DEFINITIVO

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.



Documento informatico firmato digitalmente
ai sensi dell'art. 24 D.Lgs. 82/2005 e ss.mm.ii

INDICE

1. PREMESSA	3
2. TIPOLOGIE DI INCIDENTI.....	4
3. COLLISIONE CON AEROMOBILI	4
4. INCIDENTI DOVUTI A SORGENTI INTERNE O A FULMINAZIONE	6
5. DEFORMAZIONE, ROTTURA O RIBALTAMENTO DELLA TORRE EOLICA.....	6
6. ROTTURA ELEMENTI ROTANTI E CALCOLO DELLA RELATIVA GITTATA	7
6.1. Forze agenti sulla traiettoria.....	8
6.2. Rottura della pala alla radice e calcolo gittata nel "Worst Case"	9
6.3. Il caso studio e considerazioni nel Real Case.....	16
6.4. Probabilità di accadimento.....	26
7. CONCLUSIONI	28

 INFRASSTRUTTURE	PARCO EOLICO DI "BUDDUSO" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI	 Ingegneria & Innovazione		
		13/10/2021	REV: 1	Pag.3

1. PREMESSA

Su incarico di INFRASSTRUTTURE SpA, la società Antex Group Srl ha redatto il progetto definitivo relativo alla realizzazione di un impianto eolico nel comune di Buddusò, nella provincia del Nord-Est Sardegna, Ex Provincia di Sassari.

Il progetto prevede l'installazione di n. 7 nuovi aerogeneratori nei terreni del Comune di Buddusò, con potenza unitaria di 6 MW, per una potenza complessiva di impianto di 42 MW.

Gli aerogeneratori saranno collegati alla nuova Stazione di trasformazione Utente, posta nel comune di Buddusò, tramite cavidotti interrati con tensione nominale pari a 30 kV.

La stazione di trasformazione utente riceverà l'energia proveniente dall'impianto eolico a 30 kV e la eleverà alla tensione di 150 kV.

Tutta l'energia elettrica prodotta verrà ceduta alla rete tramite collegamento in antenna a 150 kV su una nuova Stazione Elettrica (SE) GIS di Smistamento della RTN a 150kV, denominata "Buddusò", da inserire in entra-esce alla linea RTN 150 kV "Ozieri-Siniscola 2", la cui autorizzazione è oggetto di altra iniziativa (benestare requisiti tecnici richiesto da altro produttore nominato capofila in sede di tavolo tecnico con Terna).

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.

È costituita da selezionati e qualificati professionisti uniti dalla comune esperienza professionale nell'ambito delle consulenze ingegneristiche, tecniche, ambientali e gestionali.

Sia Antex che Infrastrutture pongono a fondamento delle attività e delle proprie iniziative, i principi della qualità, dell'ambiente e della sicurezza come espressi dalle norme ISO 9001, ISO 14001 e OHSAS 18001 nelle loro ultime edizioni.

Difatti, in un'ottica di sviluppo sostenibile proprio e per i propri clienti e fornitori, le Aziende citate posseggono un proprio Sistema di Gestione Integrato Qualità-Sicurezza-Ambiente.

 INFRASTRUTTURE	PARCO EOLICO DI "BUDDUSO" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI		 Antex group <i>Ingegneria & Innovazione</i> 13/10/2021 REV: 1 Pag.4		
---	---	--	--	--	--

2. TIPOLOGIE DI INCIDENTI

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

Lo scopo sarebbe quello di ridurre i danni, causati da incidenti derivanti da tali installazioni, sino ad un rischio residuale non eliminabile o 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.

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 sempre si manifestano in concomitanza con condizioni meteorologiche complesse o molto forti o, addirittura, eccezionali, pur con i sistemi di controllo e di sicurezza dell'unità perfettamente operativi.

A seguire si analizzeranno tutti gli eventuali possibili incidenti, dandone una breve ma esaustiva descrizione, ma individuate le possibili cause e limitando l'analisi alle tipologie di incidenti legate puramente alla fase di esercizio dell'impianto, più che a quelli legati alla fase costruttiva o di dismissione che verranno trattati in specifici documenti in fase esecutiva, 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.

3. COLLISIONE CON AEROMOBILI

L'altezza cui arriva la punta di una pala di una turbina eolica di recente fabbricazione, si attesta intorno ai duecento metri. Urtare contro questo tipo di ostacoli, peraltro mobili e sottili, sembrerebbe una possibilità particolarmente sfortunata ma non impossibile, seppure la probabilità sia bassissima.

Ai sensi della circolare ENAC/2010, oltre a dotare gli aerogeneratori di opportuni segnalatori luminosi per le ore notturne e fasce di segnalazione diurna di tinta rossa sulle pale che raggiungono le altezze maggiori. Le soluzioni più adottate dalle autorità di assistenza al volo italiane, le quali sono tra le principali attrici del processo autorizzativo di un impianto eolico, sono quelle di istituire zone interdette, limitate o pericolose per il volo. Le autorità preposte aggiornano costantemente le mappe degli spazi aerei e sono in grado di stabilire motivatamente, a seguito di opportune valutazioni, se in una data area è ammissibile restringere o meno il traffico aereo. L'imposizione di vincoli e proibizioni può sempre generare malcontento nelle categorie interessate, ma in tal caso si tratta di garantire in primo luogo la sicurezza degli aeromobili

circolanti, e secondariamente è necessario considerare che le potenzialità di produzione di energia elettrica degli impianti eolici d'alta quota sono un beneficio per la collettività di molto superiore alla libertà di circolare con velivoli comunque e dovunque. Inoltre, considerando che la quota massima presumibilmente ammissibile per gli impianti di produzione di energia elettrica è di 1500-2000 m, non si impedisce la circolazione dei voli di linea, che transitano a quote sensibilmente maggiori eccetto durante le manovre di atterraggio (pertanto è estremamente improbabile ottenere permessi nei corridoi di avvicinamento agli aeroporti) i soggetti interessati dai divieti si ridurrebbero ai velivoli ultraleggeri o agli elicotteri. La seguente immagine mostra la collocazione dell'area proposta di impianto rispetto ai principali aeroporti presenti in Sardegna. Lo scalo aeroportuale più prossimo è quello di Olbia che dista circa 43 km dall'area di impianto. La distanza dall'aeroporto di Tortoli è di circa 77 km, 142 km da Cagliari e 80 km da Alghero.

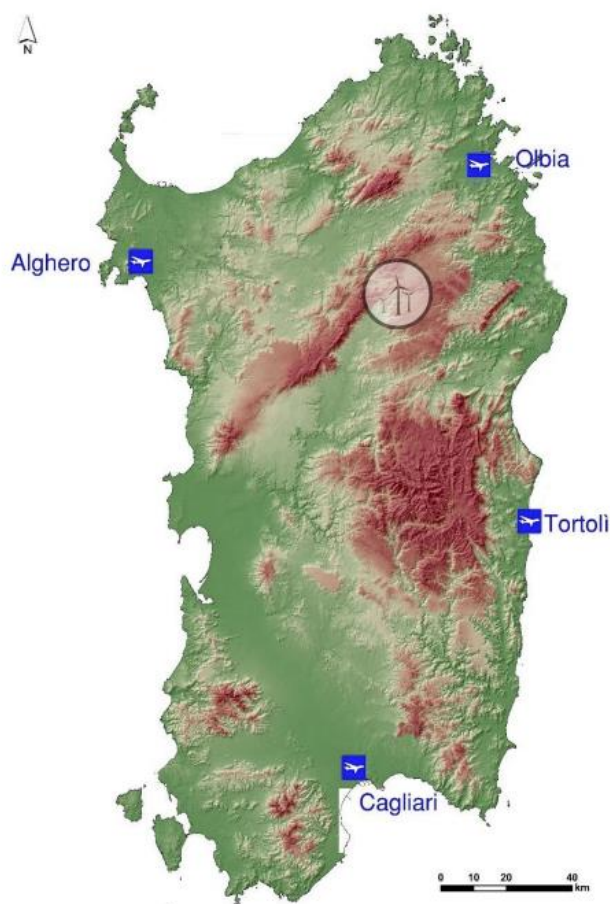


Figura 1 Localizzazione area di Impianto rispetto ai principali aeroporti di Sardegna

 INFRASTRUTTURE	PARCO EOLICO DI "BUDDUSO" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI	 Antex group Ingegneria & Innovazione
		13/10/2021 REV: 1 Pag.6

4. INCIDENTI DOVUTI A SORGENTI INTERNE O A FULMINAZIONE

Questa categoria di incidente purtroppo è la più difficile da gestire in quanto, nella maggior parte dei casi, ha origini da fenomeni meteo e, pur prendendo tutti i provvedimenti in grado di attenuarne gli effetti, non si può comunque agire sulle cause. Vista la difficoltà nel neutralizzarne le azioni, si dovranno studiare soluzioni di contenimento, cioè predisporre tutto ciò che non consenta di pervenire a conseguenze catastrofiche. La classica causa, e la più preoccupante, è quella della caduta di un fulmine sulla turbina eolica. E' una causa comune di rotture (ad es., sulla pala) o di incendio per la presenza di sostanze infiammabili (materiale strutturale delle pale, olio per il raffreddamento, vapori combustibili, etc.), che sono presenti nelle strutture eoliche. Il rotore sovente continua a funzionare e le pale a ruotare, fintanto che le fiamme non le facciano collassare, qualora sia stato compromesso anche il sistema di controllo della turbina.

Pezzi di varie dimensioni possono essere lanciati a distanze anche considerevoli. L'altezza della torre fa il resto visto che raramente è possibile provvedere ad estinguere il fuoco lì dove si è sviluppato e cioè all'altezza della navicella e del rotore.

L'operato delle Autorità locali (vigili del fuoco, polizia, etc.) in genere si limita a circoscrivere la zona per il periodo di tempo, in cui i pericoli per la popolazione siano evidenti, e per lo spazio, la cui estensione sia determinata da reali manifestazioni dannose per cose o persone (lancio di pezzi, crolli, etc.).

Oggi gli aerogeneratori sono dotati di sofisticati sistemi di convogliamento della corrente di fulminazione costituiti da recettori metallici posti lungo la pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a trasferire una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche limitando sensibilmente i danni all'aerogeneratore.

5. DEFORMAZIONE, ROTTURA O RIBALTAMENTO DELLA TORRE EOLICA

Una pala oggetto di rottura, nel suo movimento non più regolare, può colpire la torre provocando lesioni locali accompagnate da deformazioni della sezione con eventuale ripercussione sulla stabilità della navicella, che potrebbe essere catapultata a terra (rovesciamento di navicella) o incidere più profondamente sino a produrre inflessione della torre che, essendo molto sviluppata in altezza, è caratterizzata da una relativa snellezza la cui parte superiore potrebbe essere abbattuta.

Mentre nel primo caso non è detto che la navicella venga proiettata al suolo, nel secondo caso l'effetto finale è senz'altro di questo tipo. L'insieme delle forze statiche e dinamiche come l'azione del vento, le vibrazioni trasferite dai carichi che si trovano a quote superiori come navicella, rotore e pale, possono portare a rottura o crollo della torre.

Un caso di incidente ancora più radicale e grave è la distruzione dell'aerogeneratore a seguito del completo ribaltamento dello stesso. La condizione eccezionale di carico dovuta a venti di fortissima intensità in concomitanza a un non corretto dimensionamento del blocco fondario troveranno una debole attività di contrasto anti-ribaltante e di conseguenza il

 INFRASTRUTTURE	PARCO EOLICO DI "BUDDUSO" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI			 Antex group Ingegneria & Innovazione 13/10/2021 REV: 1 Pag.7		
---	---	--	--	--	--	--

blocco fondazione-aerogeneratore, rimanendo compatto ed unito, si ribalterà distruggendo completamente la turbina e creando non pochi problemi.

L'azione risultante del vento può essere considerata come una forza lungo l'asse del rotore. Ne consegue un rilevante momento flettente (forza risultante per altezza della turbina) da riportare necessariamente sul basamento. Il sottodimensionamento della fondazione ha come effetto il non riuscire ad offrire una massa adeguata e sufficiente ad opporsi al momento flettente ingenerato dal vento che raggiunge valori eccezionali.

6. ROTTURA ELEMENTI ROTANTI E CALCOLO DELLA RELATIVA GITTATA

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 all'interno della quale, in presenza di un'eventuale rottura dell'organo rotante della torre eolica, 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 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 viscosse che agendo sulla superficie della pala ne riducono, di conseguenza, tempo di volo e 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 verso orario di rotazione.

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

Altezza al Mozzo	125 m
Diametro Rotore	162 m
Lunghezza singola Pala	79.35 m
Area Spazzata	20.611 m ²
Numero Pale	3
Senso di Rotazione	Orario
Velocità di Rotazione Max a regime del Rotore	12,1 rpm
Potenza Nominale Turbina	6,0 MW
Cut-Out	24 m/s
Cut-in	3 m/s
Posizione Baricentro della pala a partire dalla radice	26,45 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”.

6.1. 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.

6.2. 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.

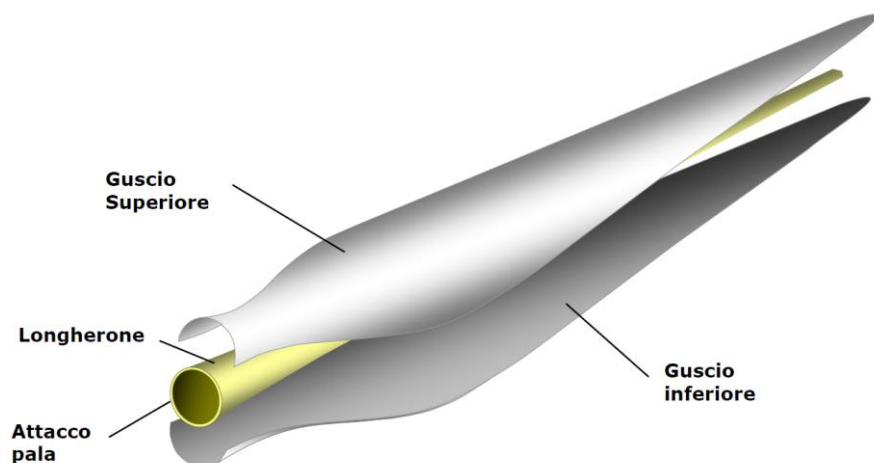


Figura 2 *Composizione di una pala*

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.

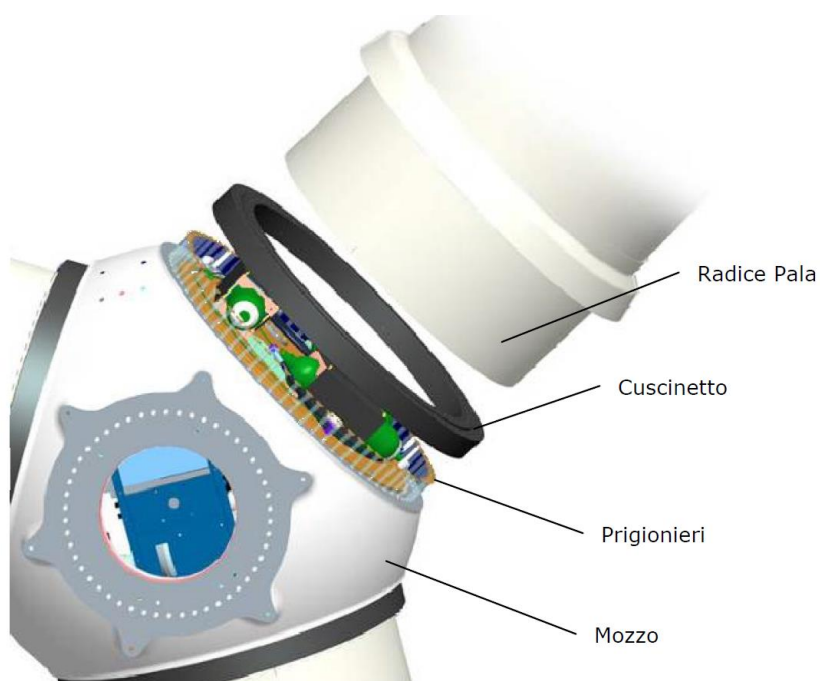


Figura 3 Collegamento pala-mozzo

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 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.

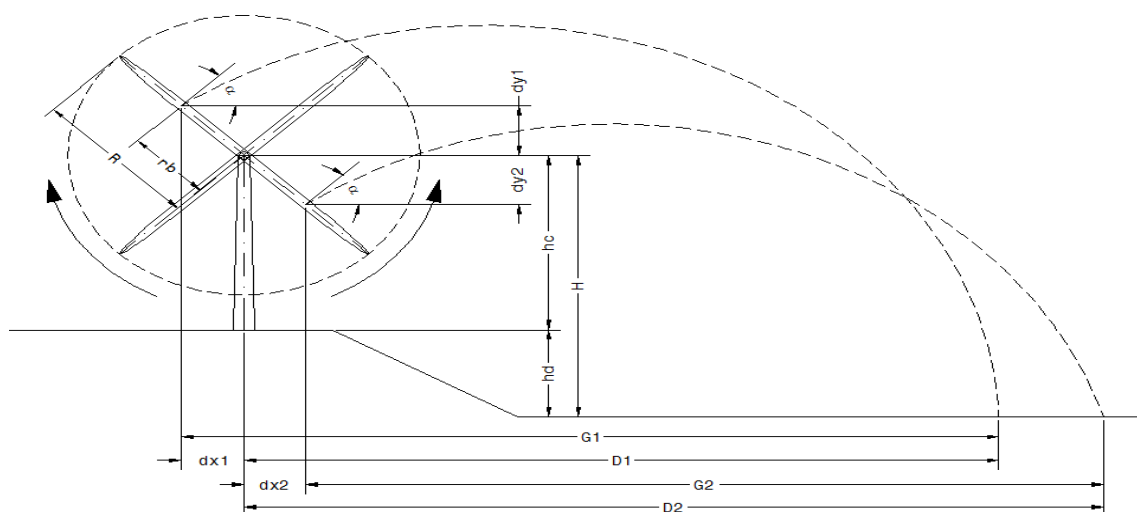


Figura 4 Schema grafico di gittata

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.

$$\left\{ \begin{array}{l} z = -g \text{ nella direzione verticale} \\ x = 0 \text{ nella direzione orizzontale} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z = h + vt \sin \alpha - \frac{1}{2} gt^2 \\ x = vt \cos \alpha \end{array} \right.$$

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 26,45 m a partire dalla radice della stessa, e ad una distanza dal centro di rotazione pari a circa $r_b = 28,10$ m, dovendo aggiungere ulteriori 1,65 m considerando che il diametro dell' Hub è pari a circa 3,3 m.

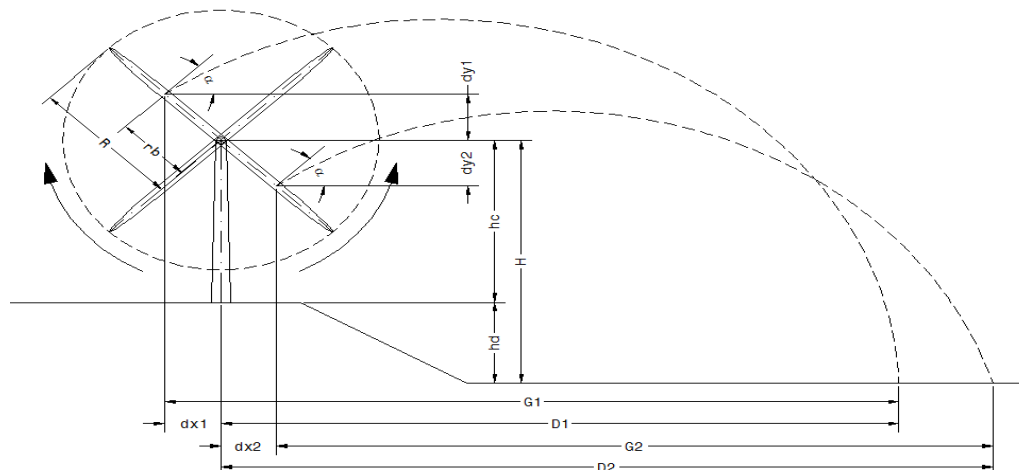
Il produttore dichiara che la velocità massima del rotore a pieno regime è di $n = 12,1$ rpm.

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:

 INFRASTRUTTURE	PARCO EOLICO DI "BUDDUSO" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI		 Ingegneria & Innovazione	
	13/10/2021	REV: 1	Pag.13	

$$v_o = \omega r_b = 2\pi n / 60 \cdot r_b = 35,61 \text{ m/sec}$$

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 valore massimo di gittata del baricentro del corpo:



g	V. pale	R	rb	hc	hd
[m/s ²]	[giri/min]	[m]	[m]	[m]	[m]
9,81	12,10	81,00	28,10	125,00	

Vo	H
[m/s]	[m]
35,61	125,00

H + rb	D (SIA)
[m]	[m]
153,10	198,92

α	Vox	Voy	dx1	dy1	H1	t1	G1	D1
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
33,18	29,80	19,49	23,52	15,38	140,38	7,69	229,25	205,73

α	Vox	Voy	dx2	dy2	H2	t2	G2	D2
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
26,81	31,78	16,06	25,08	12,67	112,33	6,69	212,75	237,83

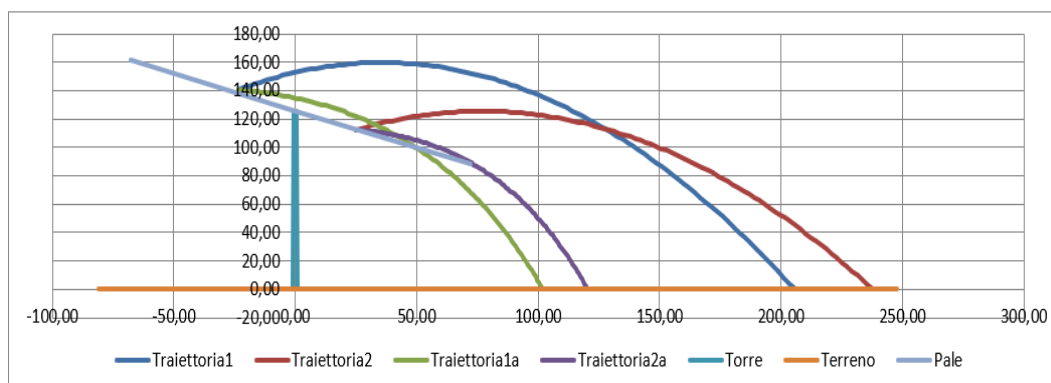


Figura 5 Calcolo della gittata mediante interpolazione dei valori assunti dall'angolo di lancio α in WORST CASE

come si evidenzia dal grafico e dalle tabelle sopra riportate il valore massimo che assume la gittata al baricentro è G_2 , pari a circa 212,75 m, con un angolo di distacco α pari a $26,81^\circ$, ai quali bisogna aggiungere la componente orizzontale d_{x2} come distanza del baricentro dall'asse torre al momento del distacco pari a 25,08 m per una distanza D_2 totale pari a 237,83 m. 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 distanza del vertice della pala più distante dal baricentro, circa 52,90 m, per un valore complessivo della gittata pari a circa D_{tot} di 290,73 m.

6.3. Il caso studio e considerazioni nel Real Case

Nello specifico, il presente elaborato ha lo scopo di valutare la possibilità di impatto generato dalla rottura di un elemento rotante di uno dei 7 aerogeneratori proposti su eventuali ricettori.

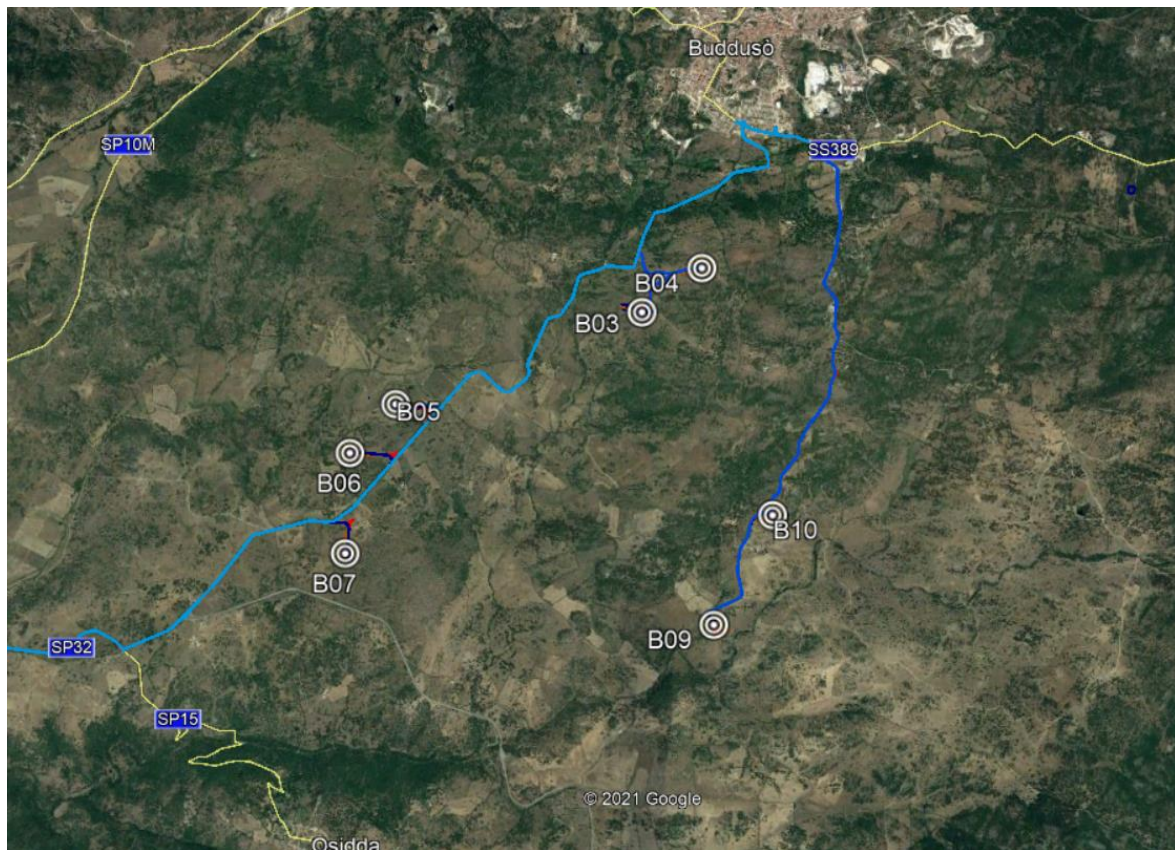


Figura 6 Inquadramento satellitare delle posizioni degli aerogeneratori proposti

La disposizione prevista per le 7 turbine oggetto di studio è riportata nella tabella sottostante in coordinate UTM WGS84.

Tabella 1 Coordinate dei 7 aerogeneratori oggetto di studio.

Turbine	Easting	Northing
B-03	520952.00 m E	4489868.00 m N
B-04	521394.00 m E	4490194.00 m N
B-05	519113.00 m E	4489186.00 m N
B-06	518768.00 m E	4488821.00 m N
B-07	518736.00 m E	4488072.00 m N
B-09	521497.56 m E	4487542.40 m N
B-10	521933.92 m E	4488366.72 m N

Di seguito si riporta l'elenco dei ricettori regolarmente censiti al Catasto Fabbricati presenti nel raggio di 700 metri e oltre dalle posizioni delle turbine di impianto come indicato dalla Delib.G.R. n.59/90 del 27.11.2020:

Tabella 2 Elenco ricettori regolarmente censiti nel raggio di 700 m dagli aerogeneratori

RICETTORE	COMUNE	FOGLIO	P.LLE	CATEG. CATASTALE	DISTANZA DA WTG PIU' VICINA
REC01	BUDDUSO'	49	353	D10	723 m (B04)
REC02	BUDDUSO'	49	334	D10	728 m (B04)
REC03	BUDDUSO'	49	306	D/10	750 m (B04)
REC04	BUDDUSO'	49	305	D10	704 m (B04)
REC05	BUDDUSO'	49	307	D10	739 m (B04)
REC06	BUDDUSO'	49	301	F2	-----
REC07	BUDDUSO'	49	254	D10	868 m (B04)
REC09	BUDDUSO'	49	292	F2	-----
REC10	BUDDUSO'	49	252	F2	-----
REC12	BUDDUSO'	45	217	D10	715 m (B03)
REC13	BUDDUSO'	45	205	D10	760 m (B03)
REC14	BUDDUSO'	45	216	D10	777 m (B03)
REC17	BUDDUSO'	58	193	A3	450 m (B06)
REC18	BUDDUSO'	58	184	D10	481 m (B06)
REC22	BUDDUSO'	45	227	D10	210 m (B05)

REC23	BUDDUSO'	45	229	D10	243 m (B05)
REC24	BUDDUSO'	45	210	D10	438 m (B05)
REC25	BUDDUSO'	45	209	D10	485 m (B05)
REC26	BUDDUSO'	45	211	D10	498 m (B05)
REC30	BUDDUSO'	45	221	F2	-----
REC47	BUDDUSO'	62	108	D10	235 m (B10)
REC48	BUDDUSO'	62	107	D10	262 m (B10)
REC49	BUDDUSO'	58	195	D10	262 m (B09)

Tra tutti i ricettori censiti nelle aree di impianto quelli più vulnerabili potrebbero essere quelli che si trovano ad una distanza pari o inferiore a quella precedentemente calcolata per la distanza massima di impatto dell'elemento rotante, e cioè 290 m circa.

Come si può facilmente notare dalla tabella precedente, cinque di questi ricettori ricadono all'interno di questo raggio d'azione e quindi potrebbero essere definiti "ricettori sensibili".

Nella tabella a seguire sono riportati i riferimenti geografici (coordinate UTM WGS84) dei ricettori in oggetto

Tabella 3 Coordinate UTM WGS 84 dei ricettori oggetto di studio

Ricettore	Est	North	Destinazione d'Uso
REC 22	519328.59 m E	4489218.43 m N	D 10
REC 23	519358.82 m E	4489197.57 m N	D 10
REC 47	521857.37 m E	4488127.78 m N	D 10
REC 48	521833.66 m E	4488116.62 m N	D 10
REC 49	521372.60 m E	4487775.42 m N	D 10

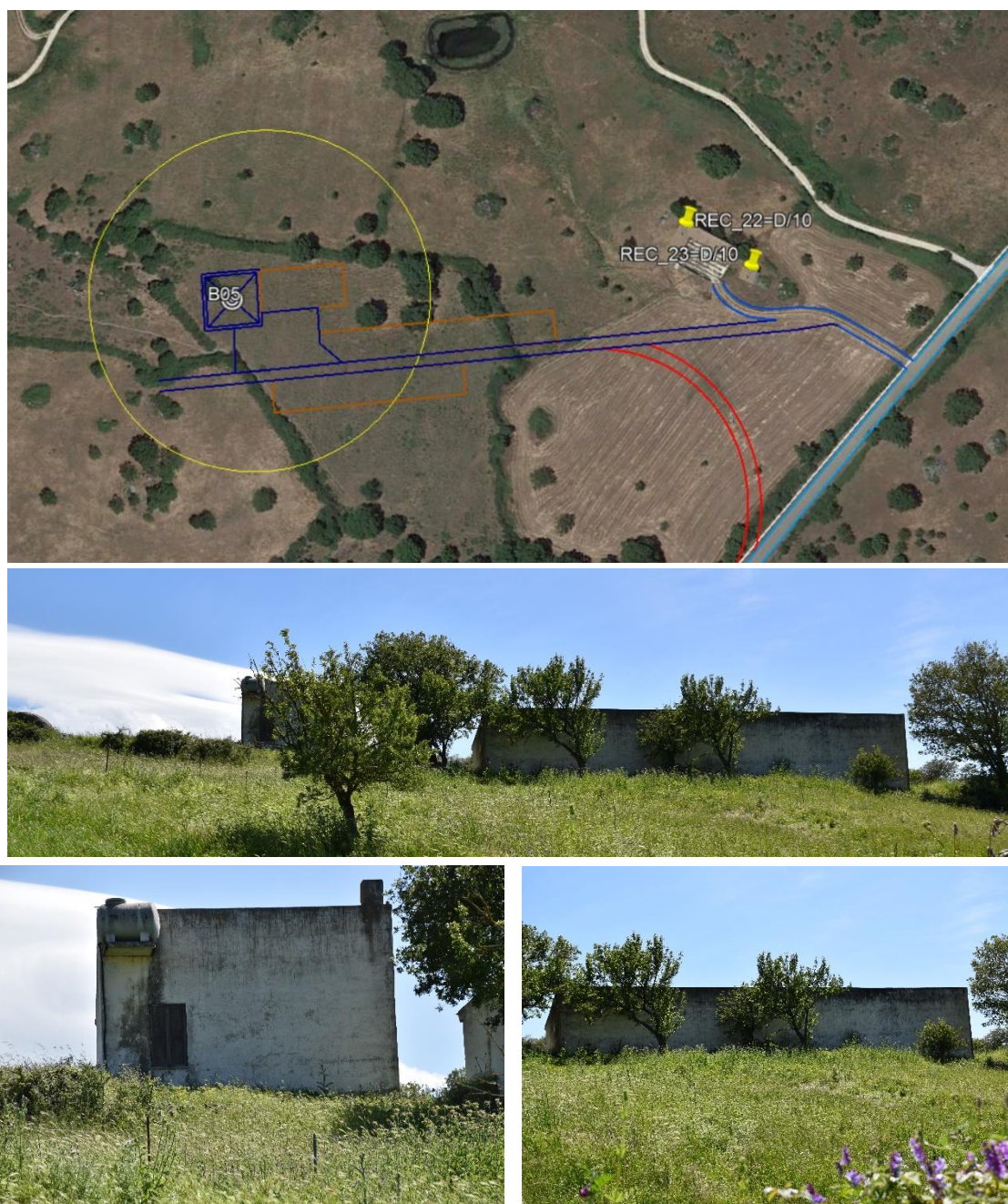


Figura 7 Ricettori REC 22 (in basso a destra) e REC 23 (in basso a sinistra)

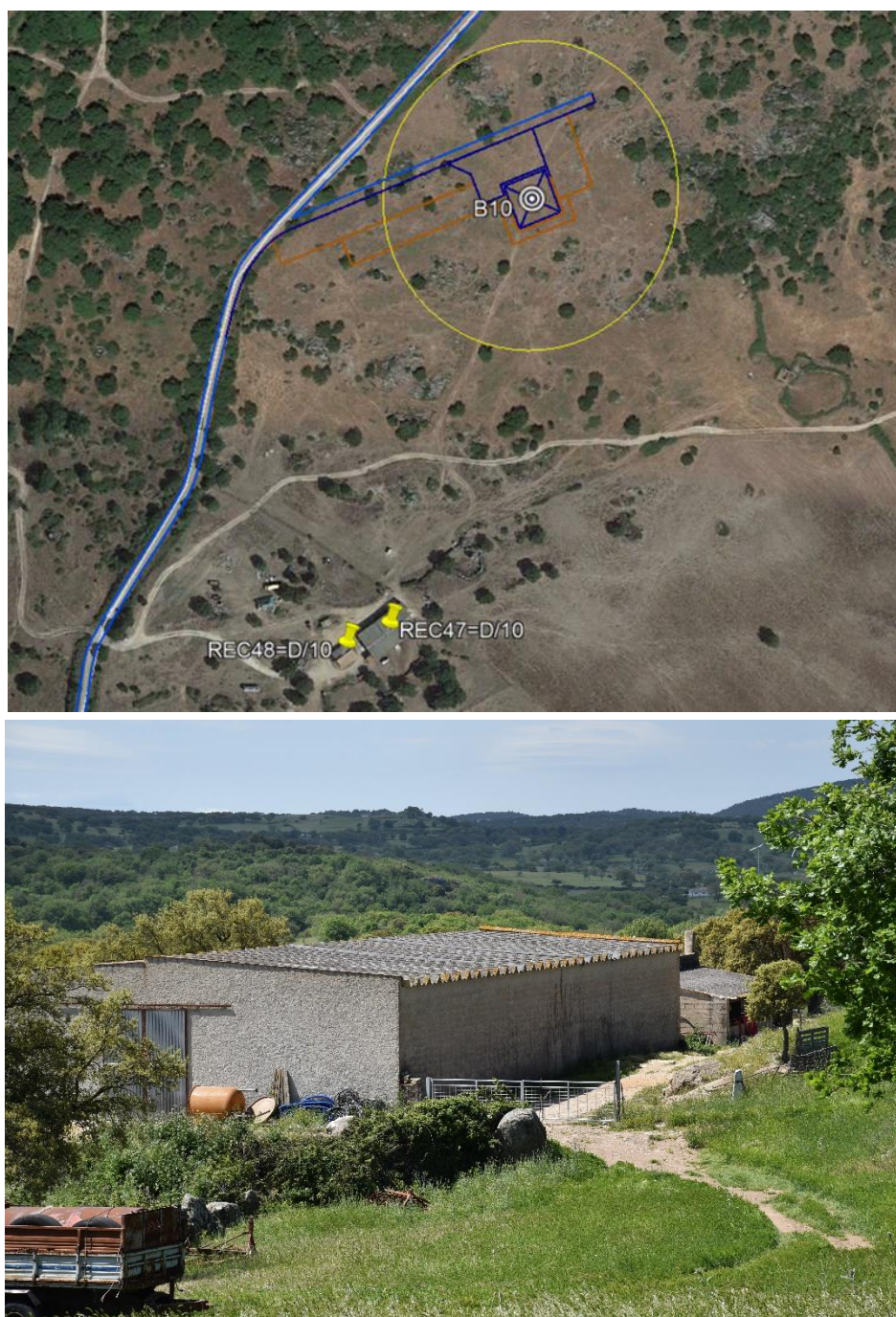


Figura 8 Ricettori REC 48 (a destra) e REC 47 (a sinistra)

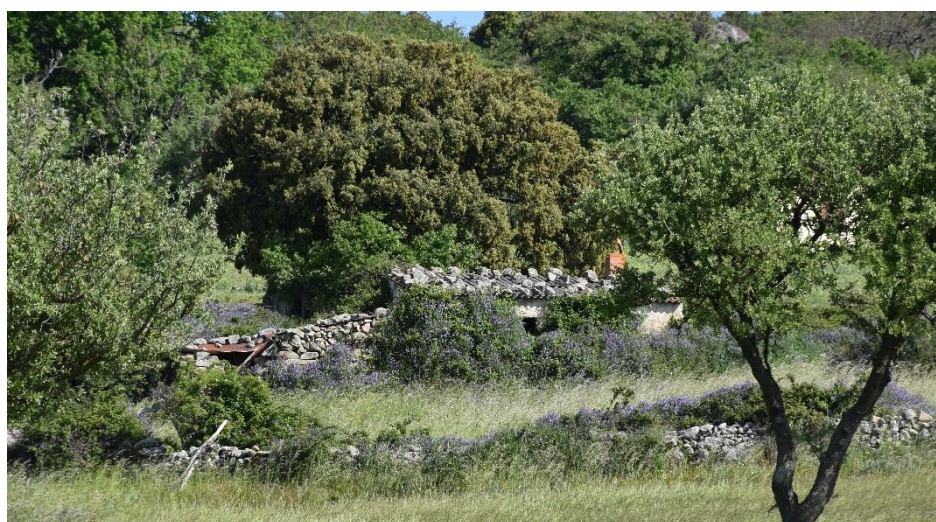
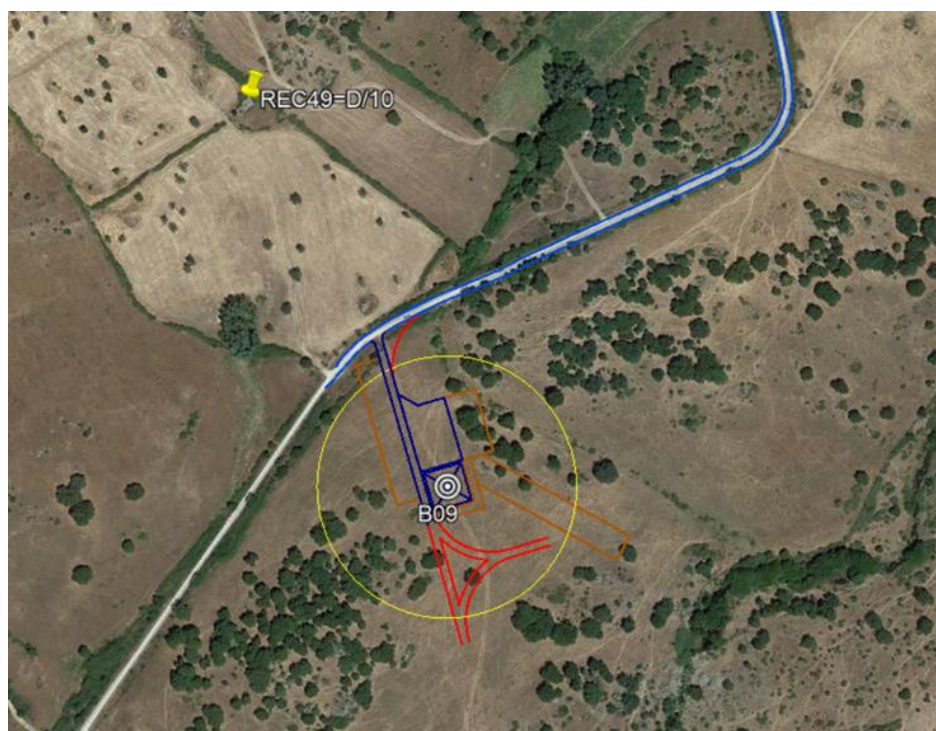


Figura 9 Ricettore REC 49

Inoltre, il calcolo della gittata in Worst Case (e cioè nelle condizioni sfavorevoli) illustrato nei paragrafi precedenti porta ad un valore massimo pari a 290,73 m e come evidenziato dalla seguente tabella, con questo valore di gittata, le uniche interferenze si hanno con la SP 107 da parte degli aerogeneratori B-05, B-06 e B-07 ma solo per pochi metri essendo tutte distanti oltre i 260 m.

Tabella 4 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
B-03	340	SP107
B-04	480	SP107
B-05	261	SP107
B-06	275	SP107
B-07	260	SP107
B-09	2100	SP107
B-10	2200	SP15

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 non può essere eliminato: presenza di attrito

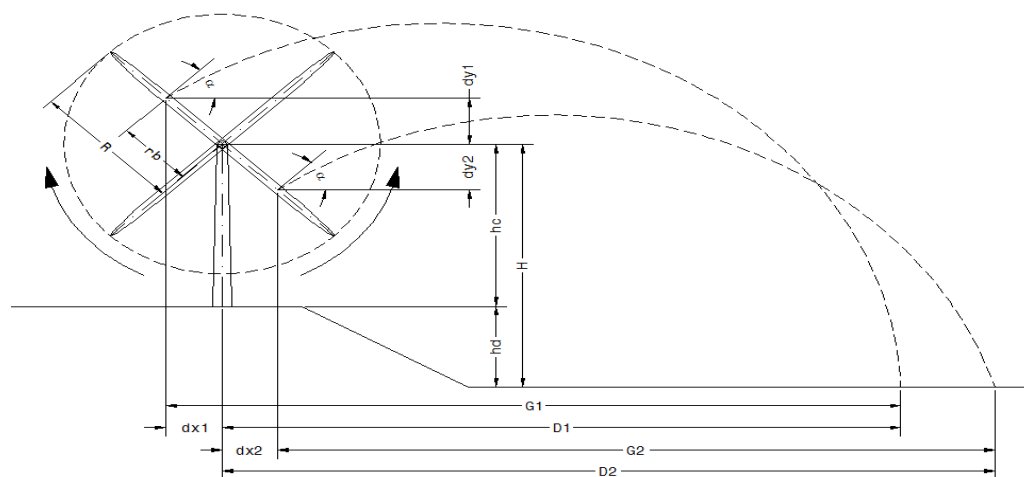
viscoso dovuto all'aria e pendenza del terreno tra la posizione della turbina e il ricettore sensibile.

Quindi, inserendo nel calcolo queste ulteriori variabili, l'attrito viscoso dell'aria γ e contestualmente un eventuale dislivello dal piede dell'aerogeneratore rispetto al relativo ricettore, otterremo risultati sicuramente più vicini alla realtà. Per quanto concerne l'attrito dell'aria possiamo sicuramente considerarlo comune a tutte le casistiche prese in esame. La differenza di dislivello tra l'aerogeneratore ed il ricettore di riferimento viene invece valutata caso per caso nella seguente tabella:

Tabella 5 *Differenza di quota tra il ricettore e il relativo aerogeneratore*

RICETTORE E QUOTA		AEROGENERATORE DI RIFERIMENTO		DISLIVELLO
		E QUOTA		
REC 22	647 m	B-05	645 m	-2 m
REC 23	647 m	B-05	645 m	-2 m
REC 47	621 m	B-10	644 m	23 m
REC 48	621 m	B-10	644 m	23 m
REC 49	606 m	B-09	596 m	-10 m

Naturalmente andremo ad utilizzare quella che sicuramente ci darà un risultato di gittata maggiore e cioè quando il ricettore si trova in posizione depressa rispetto all'aerogeneratore e quindi il caso dei ricettori REC 47 e 48 rispetto all'aerogeneratore B-10. Inserendo adesso le nuove variabili si otterrà:



g	V. pale	R	rb	hc	hd
[m/s ²]	[giri/min]	[m]	[m]	[m]	[m]
9,81	12,10	81,00	28,10	125,00	23,00

Vo	H
[m/s]	[m]
35,61	148,00

H + rb	D (SIA)
[m]	[m]
176,10	213,34

Gamma
[Adim]
0,170

α	Vox	Voy	dx1	dy1	H1	t1	G1	D1
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
31,79	30,26	18,76	23,88	14,80	162,80	7,98	241,58	217,69

t1	D1
[s]	[m]
6,00	105,24

α	Vox	Voy	dx2	dy2	H2	t2	G2	D2
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
25,48	32,14	15,32	25,37	12,09	135,91	7,05	226,67	252,04

t2	D2
[s]	[m]
5,42	123,90

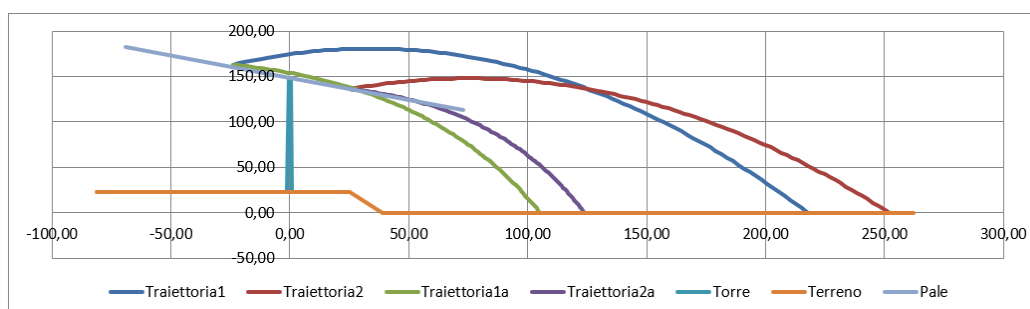


Figura 10 Calcolo della gittata mediante interpolazione dei diversi valori assunti dall'angolo di lancio α in REAL CASE considerando un dislivello in posizione sottomessa del ricevitore rispetto all'aerogeneratore e la presenza di attrito viscoso dovuto all'aria

Come si evidenzia dal grafico e dalle tabelle sopra riportati il valore massimo della gittata D_{max} , dovuto sia al dislivello sia all'attrito viscoso dovuto all'aria a diminuire sensibilmente e apportando un abbattimento della distanza di gittata di circa il 50% raggiungendo i 123,90 m. In quest'ultimo caso, e a prova della bontà del calcolo, il tempo di volo dovuto al solo attrito si riduce da 7,05 s a 5.23 s che è una diminuzione di circa il 20%, compatibilmente con quanto descritto in letteratura a causa degli effetti di attrito ("Blade throw calculation under normal operating conditions" VESTAS AS

Denmark July 2001). 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 non nel verso del moto, a tale valore dovrà aggiungersi la distanza del vertice della pala dal baricentro, circa 54,00 m, per un valore complessivo della gittata pari a circa $D_{tot}=177,9$ m, valore abbondantemente fuori dalla distanza effettiva aerogeneratore-ricettore.

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 (cioè, realizzazione, esercizio e dismissione oltre alla impostazione). È ovvio che in questo momento 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 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 paradigma essenziale della loro esistenza nel panorama industriale dei nostri paesi. È naturale che se in un dato periodo di tempo, che è solitamente tagliato sull'anno, non si devono riconoscere 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;

 INFRASTRUTTURE	PARCO EOLICO DI "BUDDUSO" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI		 Antex group <i>Ingegneria & Innovazione</i>		
			13/10/2021	REV: 1	Pag.27

- P₄ 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.

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

- alla velocità nominale;
- durante la frenata meccanica;
- 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 volta 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

7. CONCLUSIONI

In conclusione, la gittata massima calcolata in Worst Case garantisce già la distanza di sicurezza sia da strade provinciali e statali sia dagli immobili regolarmente censiti presenti nell'area del parco ad eccezione dei ricettori REC 22, REC 23, REC 47, REC 48, REC 49 che vengono a trovarsi all'interno del raggio d'azione del fenomeno ipotizzato, anche se di pochi metri. Il Worst Case è però una condizione estremamente peggiorativa che non trova alcuna rispondenza con la realtà dell'evento fisico in oggetto. Infatti, applicando solo alcune semplici considerazioni che riportano le ipotesi di calcolo quanto più vicine alla realtà, il valore della gittata in Real Case si è sensibilmente ridotto (di circa il 50%) portando il luogo dell'ipotizzato e sfortunato impatto dell'elemento rotante a circa 177 m di distanza dal ricettore più vicino. Questa distanza è quindi da considerarsi ampiamente in sicurezza.