

# REGIONE SARDEGNA

Provincia di Medio Campidano (VS)

## COMUNI DI SAMASSI E SERRENTI



2	EMISSIONE INTEGRAZIONI MITE	11/11/22	FURNO C.	FURNO C.	NASTASI A.
1	EMISSIONE PER ENTI ESTERNI	01/10/21	FURNO C.	FURNO C.	NASTASI A.
0	EMISSIONE PER COMMENTI	07/07/21	FURNO C.	FURNO C.	NASTASI A.
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROL.	APPROV.

Committente:

**SORGENIA RENEWABLES S.R.L.**



Sede legale in Via Algardi Alessandro, 4, 20148, Milano (MI)  
Partita I.V.A. 10300050969 - PEC: sorgenia.renewables@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 "SAMASSI - SERRENTI"**

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:

C20010S05-VA-RT-08-02

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.



## INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. TIPOLOGIE DI INCIDENTI.....	5
3. COLLISIONE CON AEROMOBILI.....	5
4. INCIDENTI DOVUTI A SORGENTI INTERNE O A FULMINAZIONE.....	6
5. DEFORMAZIONE, ROTTURA O RIBALTAMENTO DELLA TORRE EOLICA.....	7
6. ROTTURA ELEMENTI ROTANTI E CALCOLO DELLA RELATIVA GITTATA.....	7
6.1. Forze agenti sulla traiettoria.....	9
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.....	23
7. CONCLUSIONI.....	24

## 1. PREMESSA

Il soggetto proponente del progetto in esame è Sorgenia Renewables S.r.l., interamente parte del gruppo Sorgenia, uno dei maggiori operatori energetici italiani. Il Gruppo è attivo nella produzione di energia elettrica con oltre 4.750 MW di capacità di generazione installata e oltre 400.000 clienti in fornitura in tutta Italia. Efficienza energetica e attenzione all'ambiente sono le linee guida della sua crescita. Il parco di generazione, distribuito su tutto il territorio nazionale, è costituito dai più avanzati impianti a ciclo combinato e da impianti a fonte rinnovabile, per una capacità di circa 370 MW tra biomassa ed eolico. Nell'ambito delle energie rinnovabili, il Gruppo, nel corso della sua storia, ha anche sviluppato, realizzato e gestito impianti di tipo fotovoltaico (ca. 24 MW), ed idroelettrico (ca.33 MW). In quest'ultimo settore, Sorgenia è attiva con oltre 75 MW di potenza installata gestita tramite la società Tirreno Power, detenuta al 50%. Il Gruppo Sorgenia, tramite le sue controllate, fra le quali Sorgenia Renewables S.r.l., è attualmente impegnata nello sviluppo di un importante portafoglio di progetti rinnovabili di tipo eolico, fotovoltaico, biometano, geotermico ed idroelettrico, caratterizzati dall'impiego delle Best Available Technologies nel pieno rispetto dell'ambiente.

Su incarico di SORGENIA Renewables Srl, la società Antex Group Srl ha redatto il progetto definitivo relativo alla realizzazione di un impianto eolico nei comuni di Samassi e Serrenti, nella provincia di Medio Campidano (ex Sud Sardegna).

Il progetto prevede l'installazione di n. 11 nuovi aerogeneratori con potenza unitaria di 6 MW, per una potenza complessiva di impianto di 66 MW.

Nel dettaglio il progetto prevede l'installazione di n.6 aerogeneratori nei terreni del Comune di Samassi (VS) e di n.5 aerogeneratori nei terreni del Comune di Serrenti (VS).

Gli aerogeneratori saranno collegati alla nuova Stazione di trasformazione Utente, posta nel comune di Sanluri (VS), 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) di Trasformazione a 380/150 kV della RTN, denominata "Sanluri", da inserire in entra-esce alla linea RTN 380 kV "Ittiri-Selargius", la cui autorizzazione è oggetto di altra iniziativa (benessere 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 Sorgenia 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.

Nell'ambito della procedura di Valutazione di Impatto Ambientale per il progetto in esame, l'Aeronautica Militare, con protocollo M\_D ABA001 REG2022 0029967 del 21-06-2022, ha espresso il proprio parere relativamente all'attuale configurazione di layout di impianto proposta, secondo il quale tre degli undici aerogeneratori in progetto, identificati dai codici SM-04, SM-05 e SR-07, ricadrebbero all'interno dell'impronta della Superficie di Avvicinamento dell'aeroporto di Decimomannu, in violazione delle prescrizioni dell'art. 3, comma 3, del Decreto 19.12.2012, n. 258, del Ministero della Difesa, che vieta la realizzazione di impianti eolici nelle aree site all'interno della zona di traffico dell'aeroporto e nelle aree sottostanti alle superfici di salita al decollo e di avvicinamento. Nella stessa nota, l'Aeronautica Militare ha richiesto una proposta di un differente posizionamento dei citati tre aerogeneratori, in aree esterne alle superfici di delimitazione degli ostacoli dell'aeroporto di Decimomannu.

Inoltre, il Consorzio di Bonifica Sardegna Meridionale con nota prot. n. 9159 del 23.06.2022, ha evidenziato alcune interferenze tra le opere di progetto e le opere del Consorzio di Bonifica Sardegna Meridionale, in particolare in corrispondenza degli aerogeneratori in progetto, identificati dai codici SM-03, SR-09 e SR-11.

Per risolvere le interferenze evidenziate dall'Aeronautica Militare e dal Consorzio di Bonifica della Sardegna Meridionale, il Proponente ha proposto una modifica del layout che interessa il posizionamento degli aerogeneratori SM-03, SM-04, SM-05, SR-07, SR-09 e SR-11, come evidenziato negli elaborati grafici a corredo del progetto definitivo.

A tal fine, questa relazione è stata opportunamente aggiornata per rappresentare il nuovo stato di progetto, evidenziando graficamente in modo idoneo le parti che sono state modificate o revisionate.

## 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

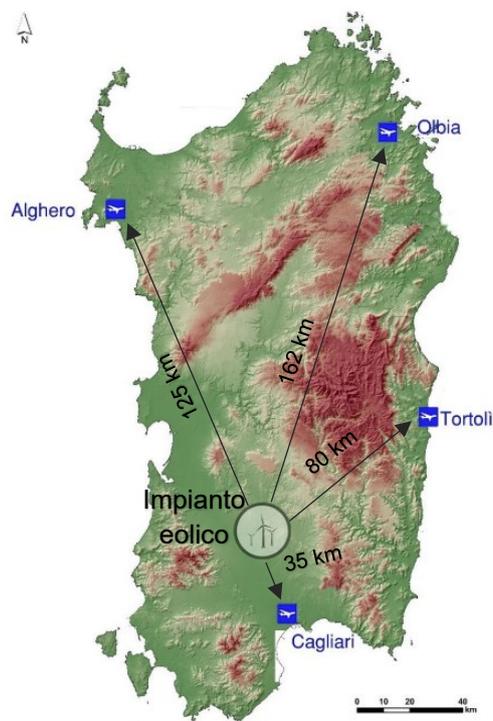
L'altezza cui arriva la punta di una pala di una turbina eolica, di recente fabbricazione, si attesta intorno ai duecento metri. Urtare contro questo tipo di ostacoli, peraltro mobili e sottili, sembrerebbe una possibilità particolarmente sfortunata ma non impossibile, seppure la probabilità sia bassissima.

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 Cagliari che dista circa 35 km dall'area di impianto. La distanza dall'aeroporto di Tortoli è di circa 80km, 162 km da Olbia e 125 km da Alghero.



**Figura 1** Distanza dall'impinto eolico agli aeroporti regionali

#### 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 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	17.647 m <sup>2</sup>
Numero Pale	3
Senso di Rotazione	Orario
Velocità di Rotazione Max a regime del Rotore	12,1 rpm
Potenza Nominale Turbina	6,00 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.

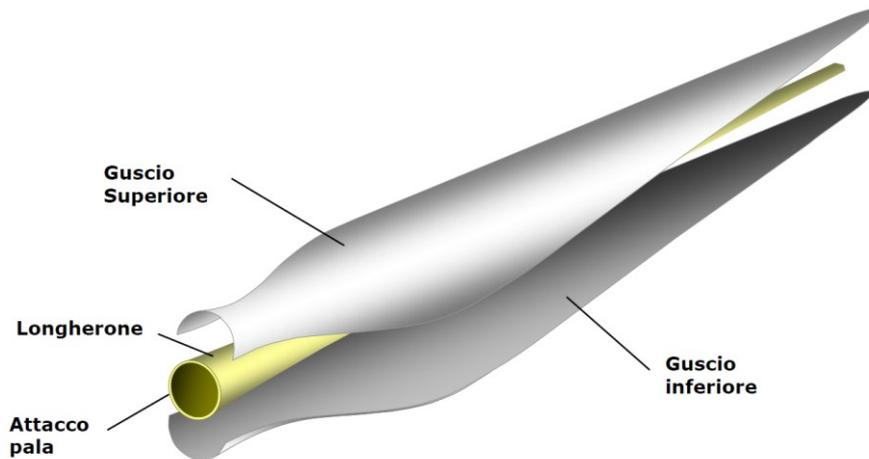
La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate inerziali agenti sulla pala. La pala quindi, quando inizierà il suo moto, continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto).

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"

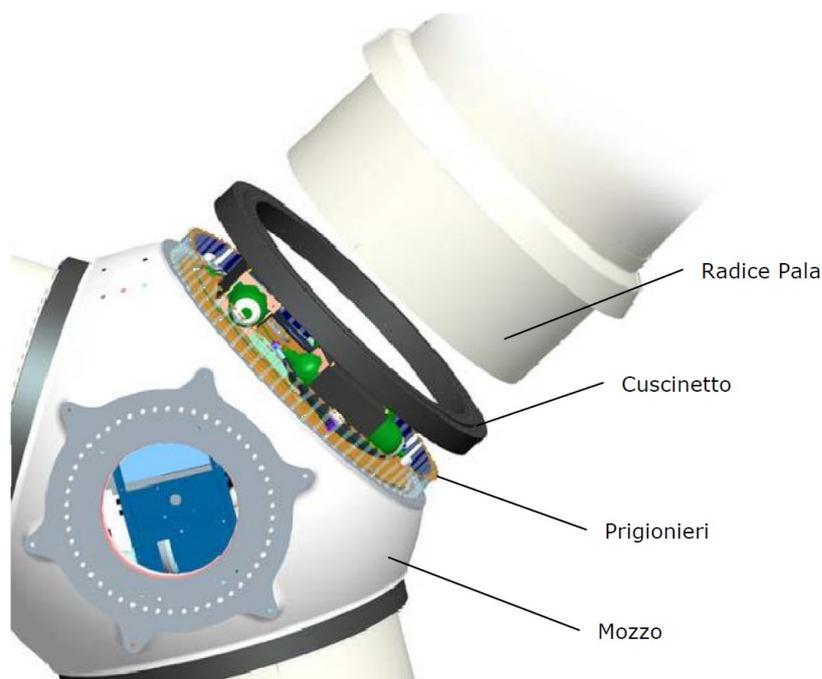
Questo tipo di incidente, che comporta il distacco di una pala completa dal rotore dell'aerogeneratore, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala ed in mozzo.

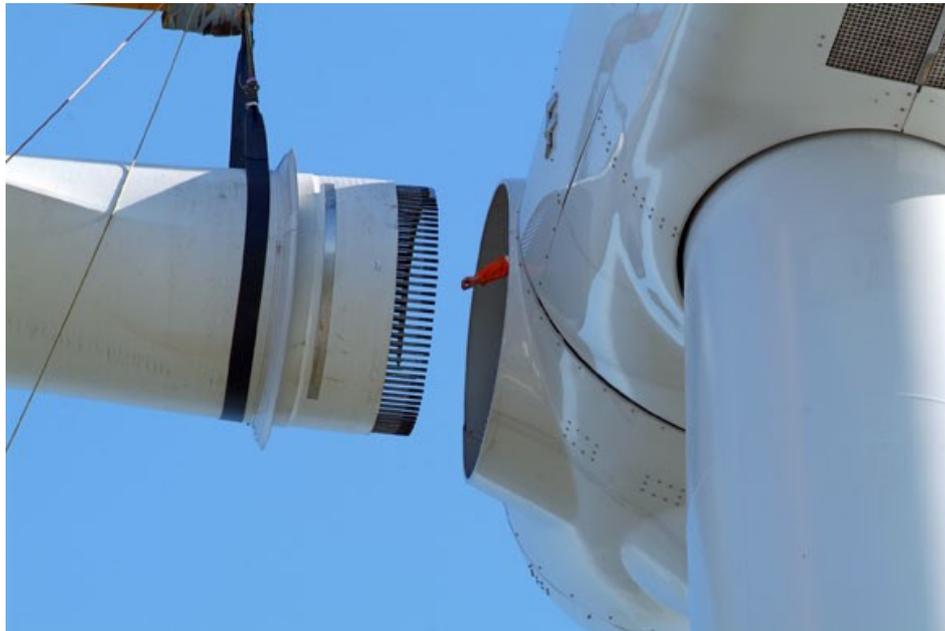
Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente compiti di forma. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono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

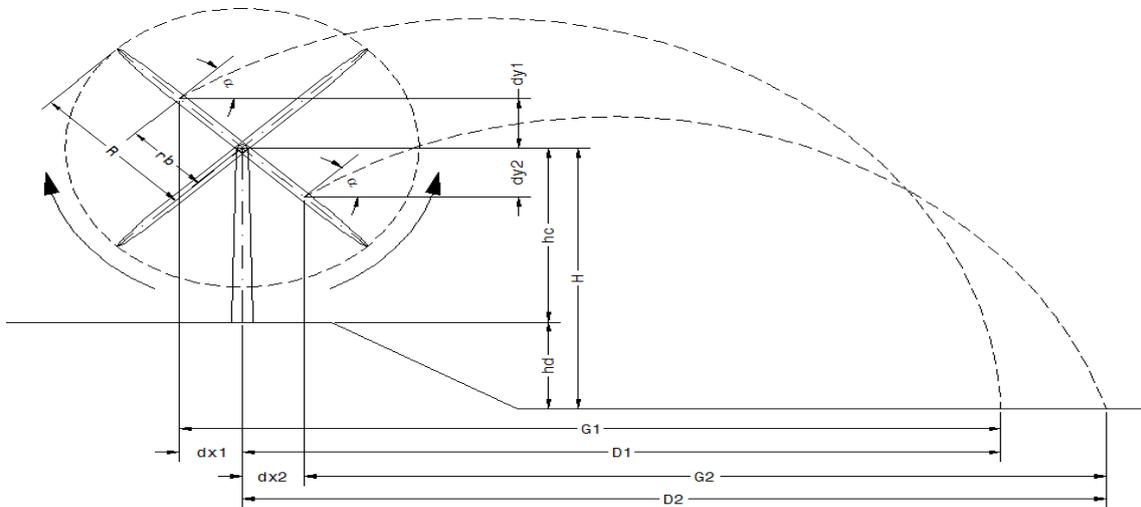




**Figura 3** Collegamento pala-mozzo

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.

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

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  $\alpha$  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  $2\pi$  radianti, per n giri avremo  $2\pi n$  radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare  $\omega$  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:

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

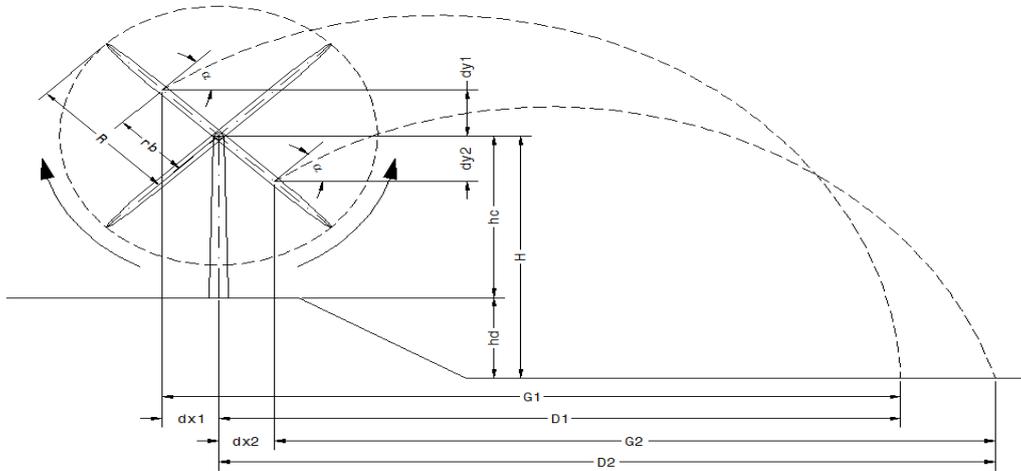
posizione e velocità iniziale sono determinati anche dall'angolo  $\alpha$  (angolo con l'orizzontale e la normale al moto) della pala al momento del distacco. Sostituendo all'espressione ricavata per T e interpolandola con i diversi valori assunti dall'angolo di lancio  $\alpha$ , si ottiene il valore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

x1 [m]	y1 [m]
-23,52	140,38
-21,22	141,85
-18,93	143,26
-16,64	144,62
-14,35	145,91
-12,05	147,15
-9,76	148,33
-7,47	149,45
-5,18	150,52
-2,88	151,52
-0,59	152,47
1,70	153,36
3,99	154,19
6,29	154,96
8,58	155,68
10,87	156,34
13,16	156,94
15,46	157,48
17,75	157,96
20,04	158,39
22,33	158,75
24,63	159,06
26,92	159,31
29,21	159,51
31,50	159,64
33,80	159,72
36,09	159,74
38,38	159,70
40,67	159,60
42,97	159,44
45,26	159,23
47,55	158,96
49,84	158,63
52,14	158,24
54,43	157,80
56,72	157,29
59,01	156,73
61,31	156,11
63,60	155,43
65,89	154,70
68,18	153,90
70,48	153,05
72,77	152,14
75,06	151,17
77,35	150,14
79,65	149,06
81,94	147,92
84,23	146,72
86,52	145,46
88,82	144,14
91,11	142,77
93,40	141,33
95,69	139,84
97,99	138,29
100,28	136,69
102,57	135,02
104,86	133,30
107,16	131,52
109,45	129,68
111,74	127,78
114,03	125,83
116,33	123,81
118,62	121,74
120,91	119,61
123,20	117,42
125,50	115,18
127,79	112,87
130,08	110,51
132,37	108,09
134,67	105,61
136,96	103,08
139,25	100,48
141,54	97,83
143,84	95,12
146,13	92,35
148,42	89,53
150,71	86,64
153,01	83,70
155,30	80,70
157,59	77,64
159,88	74,53
162,18	71,35
164,47	68,12
166,76	64,83
169,05	61,48
171,35	58,07
173,64	54,61
175,93	51,08
178,22	47,50
180,52	43,86
182,81	40,17
185,10	36,41
187,39	32,60
189,69	28,73
191,98	24,80
194,27	20,81
196,56	16,76
198,86	12,66
201,15	8,50
203,44	4,28
205,73	0,00

t2 [s]	x2 [m]	y2 [m]
0,00	25,08	112,33
0,07	27,21	113,38
0,13	29,33	114,39
0,20	31,46	115,35
0,27	33,59	116,27
0,33	35,72	117,15
0,40	37,84	117,99
0,47	39,97	118,77
0,54	42,10	119,52
0,60	44,23	120,22
0,67	46,35	120,88
0,74	48,48	121,49
0,80	50,61	122,06
0,87	52,74	122,59
0,94	54,86	123,07
1,00	56,99	123,51
1,07	59,12	123,90
1,14	61,25	124,25
1,21	63,37	124,56
1,27	65,50	124,82
1,34	67,63	125,04
1,41	69,76	125,21
1,47	71,88	125,34
1,54	74,01	125,43
1,61	76,14	125,47
1,67	78,27	125,47
1,74	80,39	125,42
1,81	82,52	125,33
1,87	84,65	125,20
1,94	86,78	125,02
2,01	88,90	124,80
2,08	91,03	124,53
2,14	93,16	124,22
2,21	95,29	123,87
2,28	97,41	123,47
2,34	99,54	123,03
2,41	101,67	122,54
2,48	103,80	122,01
2,54	105,92	121,44
2,61	108,05	120,82
2,68	110,18	120,16
2,74	112,31	119,45
2,81	114,43	118,70
2,88	116,56	117,91
2,95	118,69	117,07
3,01	120,82	116,19
3,08	122,94	115,27
3,15	125,07	114,30
3,21	127,20	113,28
3,28	129,33	112,23
3,35	131,45	111,12
3,41	133,58	109,98
3,48	135,71	108,79
3,55	137,84	107,56
3,62	139,96	106,28
3,68	142,09	104,96
3,75	144,22	103,59
3,82	146,35	102,18
3,88	148,47	100,73
3,95	150,60	99,23
4,02	152,73	97,69
4,08	154,86	96,11
4,15	156,98	94,48
4,22	159,11	92,81
4,28	161,24	91,09
4,35	163,37	89,33
4,42	165,49	87,52
4,49	167,62	85,68
4,55	169,75	83,78
4,62	171,88	81,85
4,69	174,00	79,87
4,75	176,13	77,84
4,82	178,26	75,77
4,89	180,39	73,66
4,95	182,51	71,50
5,02	184,64	69,30
5,09	186,77	67,06
5,16	188,90	64,77
5,22	191,02	62,44
5,29	193,15	60,06
5,36	195,28	57,64
5,42	197,41	55,18
5,49	199,53	52,67
5,56	201,66	50,12
5,62	203,79	47,52
5,69	205,92	44,88
5,76	208,04	42,20
5,82	210,17	39,47
5,89	212,30	36,69
5,96	214,42	33,88
6,03	216,55	31,02
6,09	218,68	28,11
6,16	220,81	25,17
6,23	222,93	22,17
6,29	225,06	19,14
6,36	227,19	16,06
6,43	229,32	12,94
6,49	231,44	9,77
6,56	233,57	6,56
6,63	235,70	3,30
6,69	237,83	0,00

t1 [s]	x1 [m]	y1 [m]
0,00	-23,52	140,38
0,06	-21,55	140,11
0,12	-19,59	139,80
0,18	-17,66	139,47
0,23	-15,75	139,11
0,29	-13,85	138,71
0,35	-11,98	138,29
0,41	-10,12	137,84
0,47	-8,28	137,36
0,53	-6,46	136,85
0,59	-4,66	136,31
0,64	-2,88	135,74
0,70	-1,11	135,14
0,76	0,64	134,52
0,82	2,37	133,87
0,88	4,09	133,20
0,94	5,78	132,49
1,00	7,47	131,76
1,06	9,13	131,00
1,11	10,78	130,22
1,17	12,41	129,41
1,23	14,02	128,58
1,29	15,62	127,72
1,35	17,21	126,83
1,41	18,77	125,92
1,47	20,33	124,99
1,52	21,86	124,03
1,58	23,38	123,05
1,64	24,89	122,04
1,70	26,38	121,02
1,76	27,86	119,96
1,82	29,32	118,89
1,88	30,77	117,79
1,93	32,20	116,67
1,99	33,62	115,52
2,05	35,02	114,36
2,11	36,41	113,17
2,17	37,79	111,96
2,23	39,16	110,73
2,29	40,51	109,47
2,34	41,84	108,20
2,40	43,17	106,91
2,46	44,48	105,59
2,52	45,77	104,25
2,58	47,06	102,90
2,64	48,33	101,52
2,70	49,59	100,12
2,76	50,83	98,71
2,81	52,07	97,27
2,87	53,29	95,82
2,93	54,50	94,34
2,99	55,70	92,85
3,05	56,88	91,34
3,11	58,06	89,81
3,17	59,22	88,26
3,22	60,37	86,70
3,28	61,51	85,11
3,34	62,64	83,51
3,40	63,76	81,89
3,46	64,86	80,25
3,52	65,96	78,60
3,58	67,04	76,92
3,63	68,11	75,23
3,69	69,18	73,53
3,75	70,23	71,81
3,81	71,27	70,07
3,87	72,30	68,31
3,93	73,32	66,54
3,99	74,33	64,75
4,04	75,34	62,95
4,10	76,33	61,13
4,16	77,31	59,30
4,22	78,28	57,45
4,28	79,24	55,58
4,34	80,19	53,70
4,40	81,14	51,81
4,46	82,07	49,90
4,51	83,00	47,97
4,57	83,91	46,03
4,63	84,82	44,08
4,69	85,71	42,11
4,75	86,60	40,13
4,81	87,48	38,14
4,87	88,35	36,13
4,92	89,21	34,11
4,98	90,07	32,07
5,04	90,91	30,02
5,10	91,75	27,96
5,16	92,58	25,88
5,22	93,40	23,79
5,28	94,21	21,69
5,33	95,01	19,58
5,39	95,81	17,45
5,45	96,60	15,31
5,51	97,38	13,16
5,57	98,15	11,00
5,63	98,92	8,82
5,69	99,67	6,63
5,74	100,42	4,43
5,80	101,17	2,22
5,86	101,90	0,00

t2 [s]	x2 [m]	y2 [m]
0,00	25,08	112,33
0,05	26,51	112,15
0,10	27,93	111,96
0,16	29,34	111,74
0,21	30,73	111,49
0,26	32,11	111,22
0,31	33,48	110,92
0,37	34,84	110,60
0,42	36,19	110,26
0,47	37,52	109,90
0,52	38,84	109,51
0,58	40,15	109,09
0,63	41,45	108,66
0,68	42,74	108,20
0,73	44,02	107,71
0,78	45,28	107,21
0,84	46,53	106,68
0,89	47,78	106,14
0,94	49,01	105,56
0,99	50,23	104,97
1,05	51,44	104,36
1,10	52,64	103,72
1,15	53,82	103,07
1,20	55,00	102,39
1,25	56,17	101,69
1,31	57,33	100,98
1,36	58,47	100,24
1,41	59,61	99,48
1,46	60,74	98,70
1,52	61,85	97,90
1,57	62,96	97,09
1,62	64,06	96,25
1,67	65,14	95,39
1,73	66,22	94,52
1,78	67,29	93,62
1,83	68,35	92,71
1,88	69,40	91,78
1,93	70,44	90,82
1,99	71,47	89,86
2,04	72,49	88,87
2,09	73,50	87,86
2,14	74,51	86,84
2,20	75,50	85,80
2,25	76,49	84,74
2,30	77,46	83,67
2,35	78,43	82,58
2,40	79,39	81,47
2,46	80,34	80,34
2,51	81,29	79,20
2,56	82,22	78,04
2,61	83,15	76,86
2,67	84,07	75,67
2,72	84,98	74,46
2,77	85,88	73,24
2,82	86,77	72,00
2,88	87,66	70,74
2,93	88,54	69,47
2,98	89,41	68,18
3,		



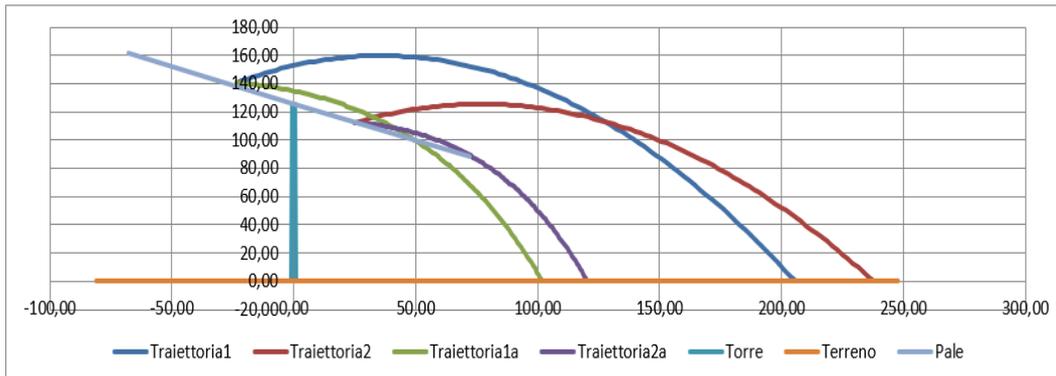
g	V. pale	R	rb	hc	hd
[m/s <sup>2</sup> ]	[giri/min]	[m]	[m]	[m]	[m]
9,81	12,10	81,00	28,10	125,00	

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

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

$\alpha$	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

$\alpha$	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



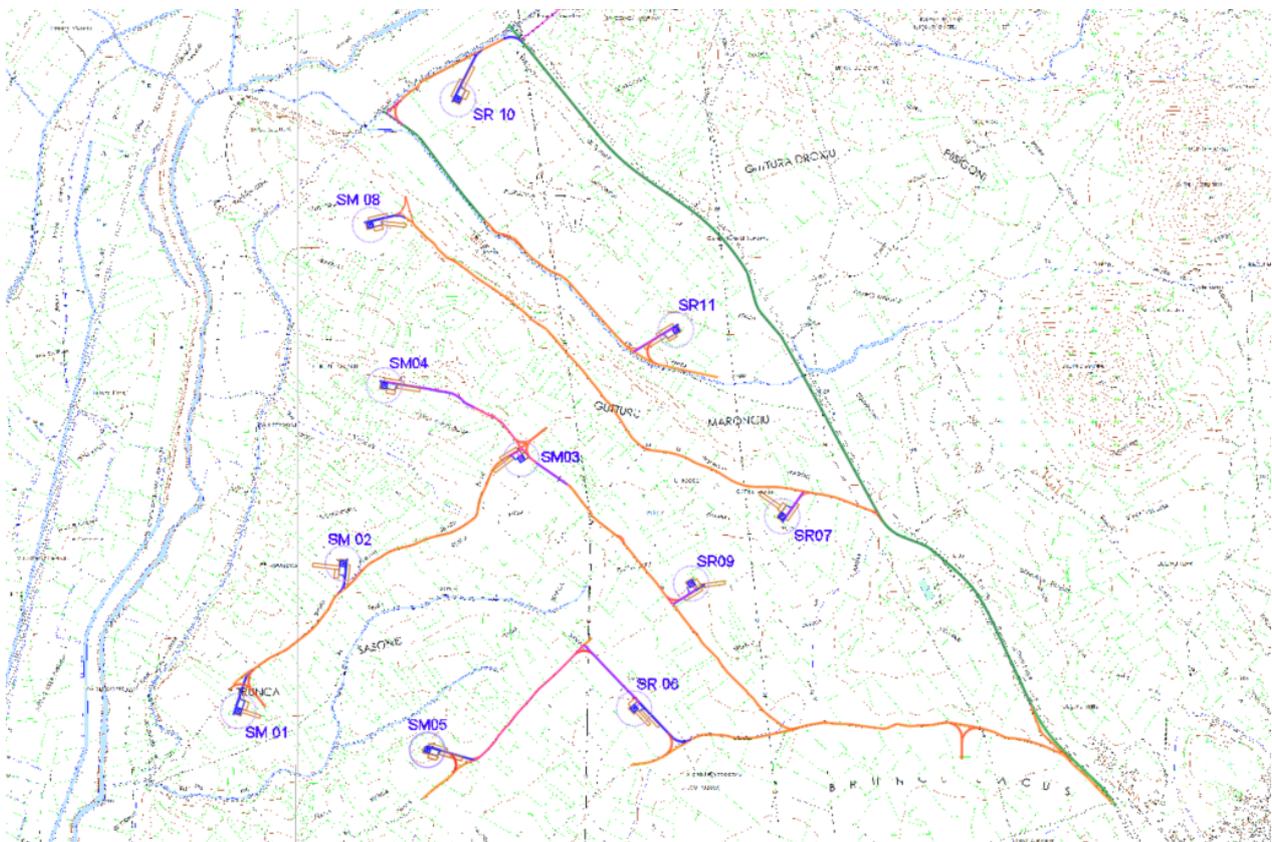
**Figura 5** Calcolo della gittata mediante interpolazione dei valori assunti dall'angolo di lancio  $\alpha$  in WORST CASE

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  $\alpha$  pari a 26,81°, 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 degli 11 aerogeneratori proposti su un eventuale ricettore.



**Figura 6** *Inquadramento degli aerogeneratori proposti su CTR*

La disposizione prevista per le 11 turbine oggetto di studio è riportata nella tabella sottostante in coordinate UTM WGS84.

<b>Turbine</b>	<b>Easting</b>	<b>Northing</b>
SM-01	492851.00 m E	4372436.00 m N
SM-02	493333.00 m E	4373120.00 m N
SM-03	494154.00 m E	4373606.00 m N
SM-04	493523.00 m E	4373946.00 m N
SM-05	493721.00 m E	4372255.00 m N
SR-06	494673.00 m E	4372447.00 m N
SR-07	495355.00 m E	4373339.00 m N
SM-08	493458.00 m E	4374691.00 m N
SR-09	494936.00 m E	4373027.00 m N
SR-10	493861.28 m E	4375274.10 m N
SR-11	494866.00 m E	4374203.00 m N

**Figura 7** Coordinate dei 11 aerogeneratori oggetto di studio.

Tra tutti i ricettori censiti nelle aree di impianto quelli più vulnerabili sono sicuramente 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.

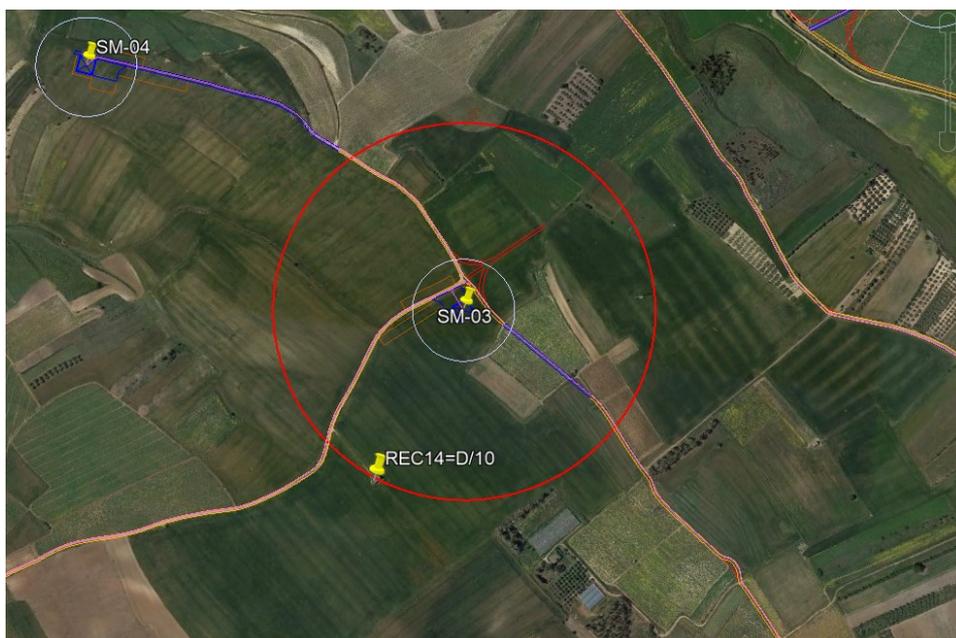
Nel progetto in esame nessun ricettore regolarmente censito si trova all'interno di questo raggio d'azione, e solo un ricettore (REC14) si trova nell'intorno di un raggio di 300 da una turbina (SM03).

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



Ricettore	Est	North	Riferimento Catastale	Destinazione d'Uso
REC 14	494033 m E	4373320 m N	C. di Samassi F. n. 14, p.lla 466	D 10

**Figura 8** Foto e Coordinate delle strutture considerate come ricettori sensibili



**Figura 9** Localizzazione geografica del ricettore (in colore giallo) rispetto alla turbina

Il calcolo di gittata in Worst Case (e cioè nelle condizioni sfavorevoli) illustrato nei paragrafi precedenti porta ad un valore massimo pari a 290,73 m. Come evidenziato dalla seguente tabella, con questo valore di gittata non si hanno problemi di impatti con nessuna strada provinciale e statale e con nessun ricettore ad eccezione del ricettore REC 14 che, rispetto alla turbina SM03 viene a trovarsi ad una distanza comunque superiore a questo valore.

AEROGENERATORE	DISTANZA MINIMA DA STRADA PROVINCIALE E/O STATALE [m]	DISTANZA MINIMA DA IMMOBILI REGOLARMENTE CENSITI (RICETTORI) [m]
SM-01	>1000	>700
SM-02	>1000	>700
SM-03	>1000	300 (REC 14)
SM-04	>1000	>700
SM-05	>1000	>700
SR-06	>1000	>700
SR-07	>390	>600 (REC 18)
SM-08	>1000	>450 (REC 32)
SR-09	>800	>450 (REC 18)
SR-10	>400	>650 (REC 32)
SR-11	>400	>500 (REC 38)

Come più volte ricordato, per la stima del valore di gittata in Worst Case, si sono 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 praticamente impossibile.

Ma soprattutto il calcolo non ha tenuto conto di un fattore dal quale non si può prescindere: la presenza dell’aria. 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.

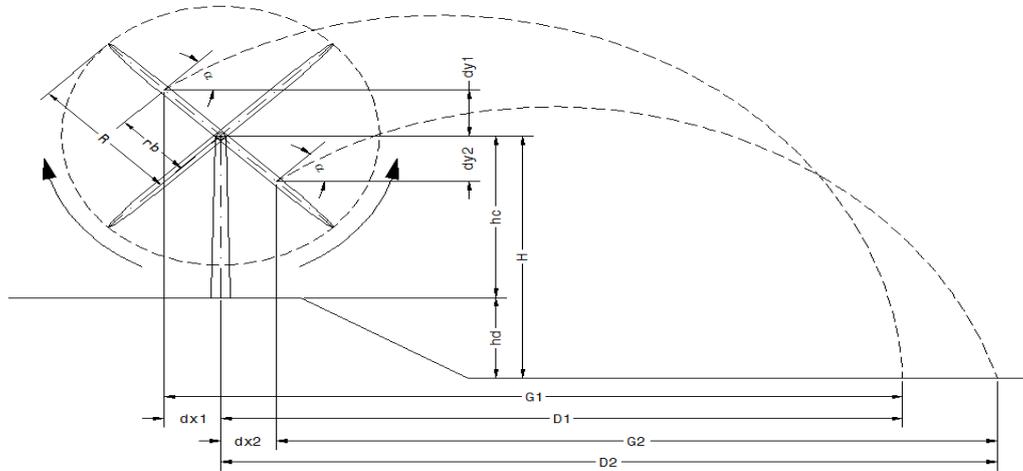
Quindi, considerando nel calcolo l'attrito viscoso dell'aria  $\gamma$  e contestualmente un dislivello aggiuntivo al piede della turbina eolica SM 03 (116 mslm), in posizione sopraelevata rispetto al ricettore REC 14 (106 mslm) di circa 10 m otteniamo i seguenti risultati:

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
0.00	-23.88	150.12
0.08	-21.34	151.59
0.16	-18.99	153.00
0.23	-16.84	154.35
0.31	-14.90	155.64
0.39	-13.25	156.88
0.47	-11.90	158.07
0.55	-10.82	159.21
0.63	-10.01	160.30
0.70	-9.46	161.34
0.78	-9.12	162.31
0.86	-8.97	163.22
0.94	-9.08	164.07
1.02	-9.43	164.85
1.09	-9.97	165.57
1.17	-10.67	166.22
1.25	-11.50	166.81
1.33	-12.44	167.34
1.41	-13.48	167.81
1.49	-14.61	168.22
1.56	-15.82	168.57
1.64	-17.10	168.86
1.72	-18.44	169.09
1.80	-19.83	169.26
1.88	-21.26	169.37
1.96	-22.72	169.42
2.05	-24.20	169.41
2.11	-25.68	169.35
2.19	-27.16	169.24
2.27	-28.63	169.08
2.35	-30.08	168.88
2.42	-31.51	168.63
2.50	-32.91	168.34
2.58	-34.28	168.00
2.66	-35.62	167.62
2.74	-36.92	167.20
2.82	-38.18	166.74
2.89	-39.40	166.24
2.97	-40.58	165.71
3.05	-41.72	165.15
3.13	-42.81	164.56
3.21	-43.86	163.93
3.28	-44.87	163.27
3.36	-45.83	162.58
3.44	-46.75	161.86
3.52	-47.62	161.11
3.60	-48.45	160.34
3.68	-49.23	159.54
3.75	-50.00	158.71
3.83	-50.73	157.85
3.91	-51.42	156.96
3.99	-52.07	156.04
4.07	-52.68	155.09
4.14	-53.25	154.11
4.22	-53.78	153.11
4.30	-54.27	152.08
4.38	-54.72	151.03
4.46	-55.13	149.95
4.54	-55.50	148.84
4.61	-55.83	147.71
4.69	-56.12	146.56
4.77	-56.37	145.39
4.85	-56.58	144.20
4.93	-56.75	143.00
5.00	-56.88	141.78
5.08	-56.97	140.54
5.16	-57.02	139.28
5.24	-57.03	138.00
5.32	-57.00	136.70
5.40	-56.93	135.38
5.47	-56.82	134.04
5.55	-56.67	132.68
5.63	-56.48	131.30
5.71	-56.25	129.90
5.79	-55.98	128.48
5.87	-55.67	127.04
5.94	-55.32	125.58
6.02	-54.93	124.10
6.10	-54.50	122.60
6.18	-54.03	121.08
6.26	-53.52	119.54
6.33	-53.00	117.98
6.41	-52.45	116.40
6.49	-51.87	114.80
6.57	-51.25	113.18
6.65	-50.60	111.54
6.73	-49.92	109.88
6.80	-49.21	108.20
6.88	-48.47	106.50
6.96	-47.70	104.78
7.04	-46.90	103.04
7.12	-46.07	101.28
7.19	-45.21	99.50
7.27	-44.32	97.70
7.35	-43.40	95.88
7.43	-42.45	94.04
7.51	-41.47	92.18
7.59	-40.46	90.30
7.66	-39.42	88.40
7.74	-38.35	86.48
7.82	-37.25	84.54

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
0.00	25.21	122.59
0.07	27.40	123.65
0.14	29.59	124.66
0.21	31.78	125.62
0.27	33.97	126.53
0.34	36.16	127.40
0.41	38.35	128.23
0.48	40.54	129.00
0.55	42.73	129.74
0.62	44.91	130.44
0.69	47.10	131.08
0.75	49.29	131.68
0.82	51.48	132.23
0.89	53.67	132.74
0.96	55.86	133.21
1.03	58.05	133.64
1.10	60.24	134.03
1.18	62.43	134.38
1.25	64.62	134.69
1.33	66.81	134.96
1.40	69.00	135.19
1.48	71.19	135.38
1.56	73.38	135.53
1.64	75.57	135.64
1.72	77.76	135.71
1.80	79.95	135.75
1.88	82.14	135.76
1.96	84.33	135.74
2.05	86.52	135.69
2.11	88.71	135.61
2.19	90.90	135.50
2.27	93.09	135.36
2.35	95.28	135.19
2.42	97.47	135.00
2.50	99.66	134.78
2.58	101.85	134.53
2.66	104.04	134.25
2.74	106.23	133.94
2.82	108.42	133.60
2.89	110.61	133.23
2.97	112.80	132.83
3.05	114.99	132.40
3.13	117.18	131.94
3.21	119.37	131.45
3.28	121.56	130.93
3.36	123.75	130.38
3.44	125.94	129.80
3.52	128.13	129.19
3.60	130.32	128.55
3.68	132.51	127.88
3.75	134.70	127.18
3.83	136.89	126.45
3.91	139.08	125.69
3.99	141.27	124.90
4.07	143.46	124.08
4.14	145.65	123.23
4.22	147.84	122.35
4.30	150.03	121.44
4.38	152.22	120.50
4.46	154.41	119.53
4.54	156.60	118.53
4.61	158.79	117.50
4.69	160.98	116.44
4.77	163.17	115.35
4.85	165.36	114.23
4.93	167.55	113.08
5.00	169.74	111.90
5.08	171.93	110.69
5.16	174.12	109.45
5.24	176.31	108.18
5.32	178.50	106.88
5.40	180.69	105.55
5.47	182.88	104.19
5.55	185.07	102.80
5.63	187.26	101.38
5.71	189.45	99.93
5.79	191.64	98.45
5.87	193.83	96.94
5.94	196.02	95.40
6.02	198.21	93.83
6.10	200.40	92.23
6.18	202.59	90.60
6.26	204.78	88.94
6.33	206.97	87.25
6.41	209.16	85.53
6.49	211.35	83.78
6.57	213.54	82.00
6.65	215.73	80.19
6.73	217.92	78.35
6.80	220.11	76.48
6.88	222.30	74.58
6.96	224.49	72.65
7.04	226.68	70.69
7.12	228.87	68.70
7.19	231.06	66.68
7.27	233.25	64.63
7.35	235.44	62.55
7.43	237.63	60.44
7.51	239.82	58.30
7.59	242.01	56.13
7.66	244.20	53.93
7.74	246.39	51.70
7.82	248.58	49.44

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
0.00	-23.88	150.12
0.08	-21.34	151.59
0.16	-18.99	153.00
0.23	-16.84	154.35
0.31	-14.90	155.64
0.39	-13.25	156.88
0.47	-11.90	158.07
0.55	-10.82	159.21
0.63	-10.01	160.30
0.70	-9.46	161.34
0.78	-9.12	162.31
0.86	-8.97	163.22
0.94	-9.08	164.07
1.02	-9.43	164.85
1.09	-9.97	165.57
1.17	-10.67	166.22
1.25	-11.50	166.81
1.33	-12.44	167.34
1.41	-13.48	167.81
1.49	-14.61	168.22
1.56	-15.82	168.57
1.64	-17.10	168.86
1.72	-18.44	169.09
1.80	-19.83	169.26
1.88	-21.26	169.37
1.96	-22.72	169.42
2.05	-24.20	169.41
2.11	-25.68	169.35
2.19	-27.16	169.24
2.27	-28.63	169.08
2.35	-30.08	168.88
2.42	-31.51	168.63
2.50	-32.91	168.34
2.58	-34.28	168.00
2.66	-35.62	167.62
2.74	-36.92	167.20
2.82	-38.18	166.74
2.89	-39.40	166.24
2.97	-40.58	165.71
3.05	-41.72	165.15
3.13	-42.81	164.56
3.21	-43.86	163.93
3.28	-44.87	163.27
3.36	-45.83	162.58
3.44	-46.75	161.86
3.52	-47.62	161.11
3.60	-48.45	160.34
3.68	-49.23	159.54
3.75	-50.00	158.71
3.83	-50.73	157.85
3.91	-51.42	156.96
3.99	-52.07	156.04
4.07	-52.68	155.09
4.14	-53.25	154.11
4.22	-53.78	153.11
4.30	-54.27	152.08
4.38	-54.72	151.03
4.46	-55.13	149.95
4.54	-55.50	148.84
4.61	-55.83	147.71
4.69	-56.12	146.56
4.77	-56.37	145.39
4.85	-56.58	144.20
4.93	-56.75	143.00
5.00	-56.88	141.78
5.08	-56.97	140.54
5.16	-57.02	139.28
5.24	-57.03	138.00
5.32	-57.00	136.70
5.40	-56.93	135.38
5.47	-56.82	134.04
5.55	-56.67	132.68
5.63	-56.48	131.30
5.71	-56.25	129.90
5.79	-55.98	128.48
5.87	-55.67	127.04
5.94	-55.32	125.58
6.02	-54.93	124.10
6.10	-54.50	122.60
6.18	-54.03	121.08
6.26	-53.52	119.54
6.33	-53.00	117.98
6.41	-52.45	116.40
6.49	-51.87	114.80
6.57	-51.25	113.18
6.65	-50.60	111.54
6.73	-49.92	109.88
6.80	-49.21	108.20
6.88	-48.47	106.50
6.96	-47.70	104.78
7.04	-46.90	103.04
7.12	-46.07	101.28
7.19	-45.21	99.50
7.27	-44.32	97.70
7.35	-43.40	95.88
7.43	-42.45	94.04
7.51	-41.47	92.18
7.59	-40.46	90.30
7.66	-39.42	88.40
7.74	-38.35	86.48
7.82	-37.25	84.54

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
0.00	25.21	122.59
0.08	27.40	123.65
0.16	29.59	124.66
0.23	31.78	125.62
0.31	33.97	126.53
0.39	36.16	127.40
0.47	38.35	128.23
0.55	40.54	129.00
0.63	42.73	129.74
0.70	44.91	130.44
0.78	47.10	131.08
0.86	49.29	131.68
0.94	51.48	132.23
1.02	53.67	132.74
1.09	55.86	133.21
1.17	58.05	133.64
1.25	60.24	134.03
1.33	62.43	134.38
1.41	64.62	134.69
1.49	66.81	134.96
1.56	69.00	135.19
1.64	71.19	135.38
1.72	73.38	135.53
1.80	75.57	135.64
1.88	77.76	135.71
1.96	79.95	1



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

Vo	H
[m/s]	[m]
35,61	135,00

H + rb	D (SIA)
[m]	[m]
163,10	205,32

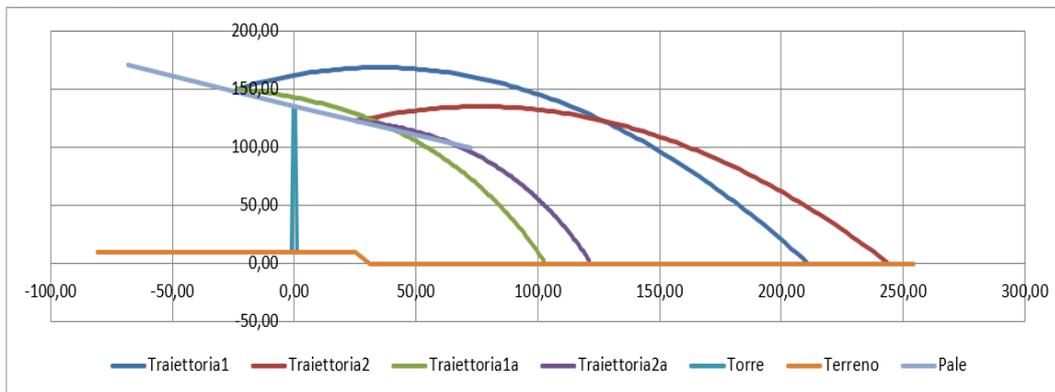
Gamma
[Adim]
0,170

$\alpha$	Vox	Voy	dx1	dy1	H1	t1	G1	D1
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
32,56	30,01	19,16	23,68	15,12	150,12	7,82	234,69	211,00

t1	D1
[s]	[m]
5,86	101,90

$\alpha$	Vox	Voy	dx2	dy2	H2	t2	G2	D2
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
26,21	31,95	15,72	25,21	12,41	122,59	6,85	218,92	244,13

t2	D2
[s]	[m]
5,23	120,38



**Figura 10** Calcolo della gittata mediante interpolazione dei diversi valori assunti dall'angolo di lancio  $\alpha$  in REAL CASE considerando un dislivello in posizione sopraelevata della turbina rispetto al ricevitore 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 al solo dislivello, porta il valore ad aumentare leggermente portandosi a 244.13 m che si riducono però a soli 120.38 m nel caso in cui viene considerato anche l'attrito viscoso dovuto all'aria e quindi un abbattimento della distanza di gittata di circa il 50%.

In quest'ultimo caso, e a prova della bontà del calcolo, il tempo di volo si riduce da 6.85 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  $D_{tot} = 174$  m.

#### 6.4. Probabilità di accadimento

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;
- 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 del ricettore REC 14 che viene a trovarsi, comunque, a distanza di sicurezza dal 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 174 m di distanza dal ricettore più vicino (REC 14). Questa distanza è quindi da considerarsi ampiamente in sicurezza.



**Figura 11** Planimetria della gittata Real Case