

# REGIONI MOLISE, CAMPANIA E PUGLIA

Province di Campobasso, Benevento e Foggia

COMUNI DI TUFARA, SAN BARTOLOMEO IN GALDO E  
SAN MARCO LA CATOLA



REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROL.	APPROV.
1	EMISSIONE PER ENTI ESTERNI	28/03/2022	FURNO C.	FURNO C.	NASTASI A.
0	EMISSIONE PER COMMENTI	02/03/2022	FURNO C.	FURNO C.	NASTASI A.

Committente:

**WIND 2 ENERGY ITALY SRL**



Sede legale in Corso Statuto, 2/C, 12084, Mondovì (CN)  
Partita I.V.A. 03945600041 - PEC: wind2energyitalysrl@pec.it

Società di Progettazione:



*Ingegneria & Innovazione*

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

Progetto:

**PARCO EOLICO DI "TUFARA"**

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:

C21024S05-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.



## INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. TIPOLOGIE DI INCIDENTI.....	4
3. COLLISIONE CON AEROMOBILI.....	4
4. INCIDENTI DOVUTI A SORGENTI INTERNE O A FULMINAZIONE.....	5
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".....	8
6.3. Il caso studio e considerazioni nel Real Case.....	17
6.4. Probabilità di accadimento.....	27
7. CONCLUSIONI.....	29

## 1. PREMESSA

Su incarico di Wind 2 Energy Italy S.r.l., la società ANTEX GROUP Srl ha redatto il progetto definitivo per la realizzazione di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica, denominato Parco Eolico "Tufara", con potenza nominale installata pari a 30,6 MW, da realizzarsi nei territori dei Comuni di Tufara (CB) in Molise, San Bartolomeo in Galdo (BN) in Campania e San Marco La Catola (FG) in Puglia. Il numero totale di turbine eoliche che saranno installate è pari a 6 con una potenza nominale pari a 5,1 MW per ogni aerogeneratore.

Wind 2 Energy Italy S.r.l. ha già ricevuto ed accettato il preventivo di connessione (Cod. Pratica: 202000903) inviato da Terna per la connessione di un impianto di generazione da fonte rinnovabile (eolica) per una potenza in immissione pari a 29,5 MW. Tale STMG prevede l'inserimento dell'impianto alla RTN mediante collegamento in antenna a 150 kV con una futura stazione di smistamento RTN 150 kV da inserire in entra-esce alla linea RTN a 150 kV "Casalvecchio-Pietracatella", previa realizzazione di un nuovo elettrodotto RTN a 150 kV di collegamento fra la futura stazione di cui sopra e la Cabina Primaria denominata "Cercemaggiore".

A seguito della scelta della Società Wind 2 Energy Italy S.r.l. di rimodulare l'impianto eolico, impiegando delle turbine eoliche con potenza nominale pari a 6 MW esercite però con la modalità Sound Optimized Mode 2 (SO2) per una erogazione massima ridotta a 5,1 MW, è stato richiesto a Terna il riesame della STMG, che preveda sia la modifica della potenza in immissione sia una soluzione di connessione a 36 kV. Si è in attesa dell'elaborazione, da parte di Terna, della nuova STMG.

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

Antex Group in un'ottica di sviluppo sostenibile proprio e per i propri clienti, è in possesso di un proprio Sistema di Gestione Qualità certificato ISO 9001:2015 per attività di "Servizi tecnico-professionali di ingegneria multidisciplinare".

## 2. TIPOLOGIE DI INCIDENTI

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

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

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

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

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

A seguire si analizzeranno tutti gli eventuali possibili incidenti dandone una breve ma esaustiva descrizione ma, individuate le possibili cause, ci si limiterà all'analisi delle tipologie di incidenti legate puramente alla fase di esercizio dell'impianto. Quelli legati alla fase costruttiva o di dismissione verranno trattati in specifici documenti in fase esecutiva. Quindi, alla luce di quanto scritto, si può affermare che la tipologia di incidente più di nostro interesse è senza dubbio la rottura degli elementi rotanti come il distacco di un'intera pala il quale verrà analizzato nel dettaglio.

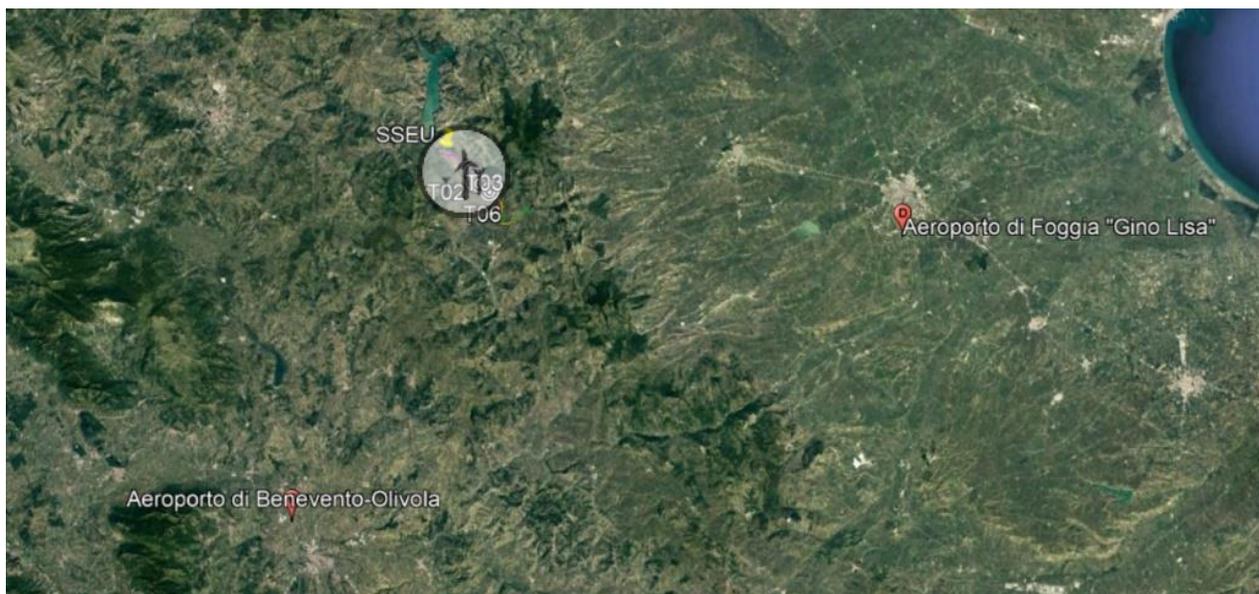
## 3. COLLISIONE CON AEROMOBILI

L'altezza che raggiunge la parte più alta 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 remota ma non impossibile.

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 al 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). Quindi in definitiva i soggetti interessati da eventuali divieti si ridurrebbero ai velivoli ultraleggeri o agli elicotteri.

La seguente immagine mostra la posizione dell'area proposta di impianto rispetto ai principali aeroporti presenti in zona. Gli scali aeroportuali più prossimi sono quelli di Benevento-Olivola in Campania e di Foggia in Puglia che distano rispettivamente circa 40 km e 45 km dall'area di impianto.



**Figura 1** Localizzazione dell'area di Impianto rispetto ai principali aeroporti presenti in zona

#### 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 direttamente sulle cause. Vista la difficoltà nel neutralizzarne le cause si potranno solo studiare soluzioni di contenimento.

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. la pala) o di incendio a causa 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, qualora sia stato compromesso anche il sistema di controllo della turbina, e quindi le pale a ruotare fintanto che le fiamme non ne determinino il collasso.

Pezzi di varie dimensioni possono essere lanciati a distanza dall'aerogeneratore. 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 strutturali alle parti dell'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 della navicella) o incidere più profondamente sino a produrre un'inflexione della torre che, essendo molto sviluppata in altezza e quindi caratterizzata da una particolare snellezza, potrebbe abbattersi nella sua parte superiore.

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 e parti di essa.

Un caso di incidente ancora più radicale e grave è la distruzione dell'aerogeneratore a seguito del completo ribaltamento dello stesso. Una condizione eccezionale di carico dovuta a venti di fortissima intensità in concomitanza a un non corretto dimensionamento del blocco fondario troverebbe una debole attività di contrasto anti-ribaltante e di conseguenza il blocco fondazione-aerogeneratore, rimanendo compatto ed unito, si ribalterà distruggendo completamente la turbina.

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 al 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 anche di elevata intensità.

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

La tipologia di 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 <sup>2</sup>
Numero Pale	3
Senso di Rotazione	Orario
Velocità di Rotazione Max a regime del Rotore	12,1 rpm

Potenza Nominale Turbina	5,1 MW in modalità MODE SO2
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).

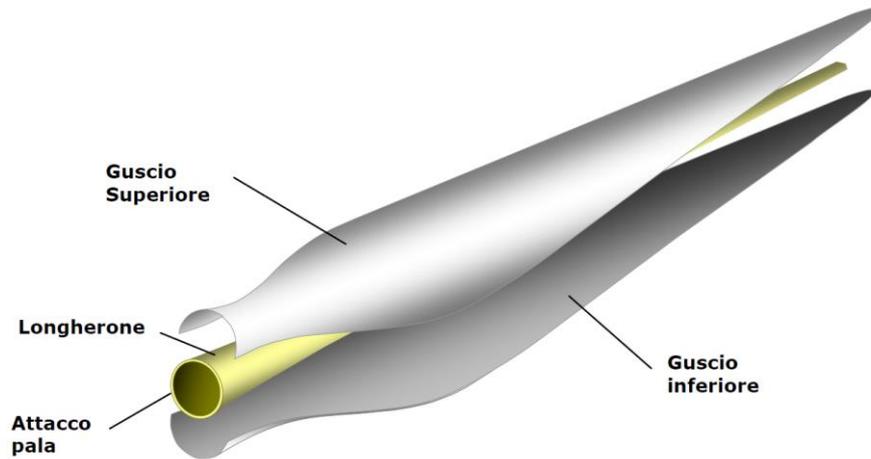
L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità. La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano. La gittata 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.

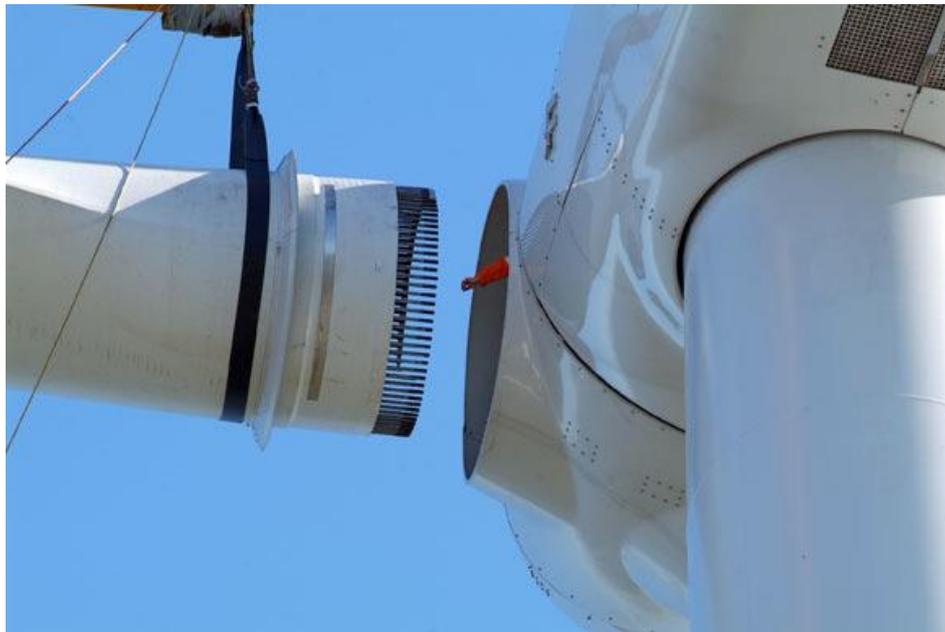
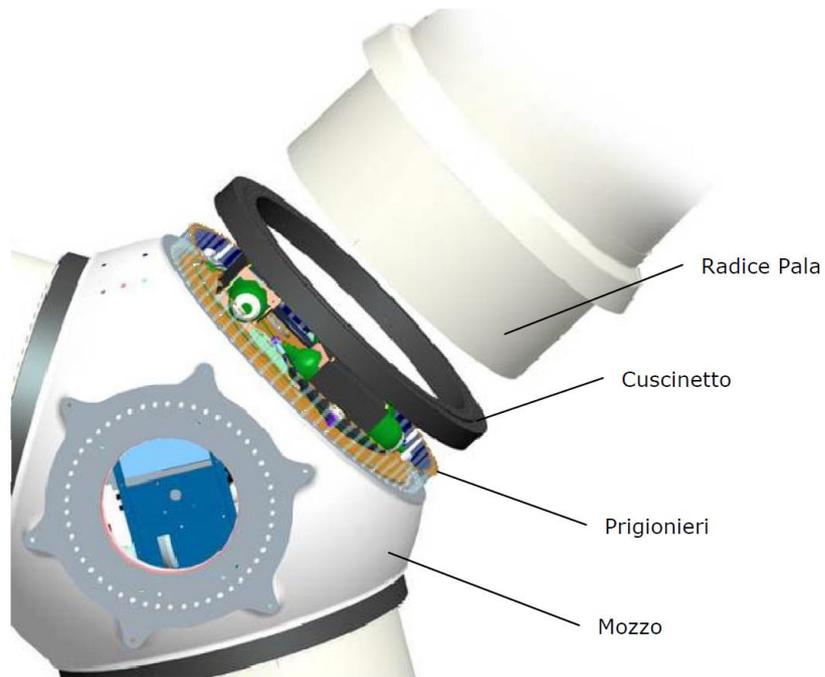
Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente compiti di forma. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante incollaggio

e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.



**Figura 2** *Stratificazione della struttura di una pala*

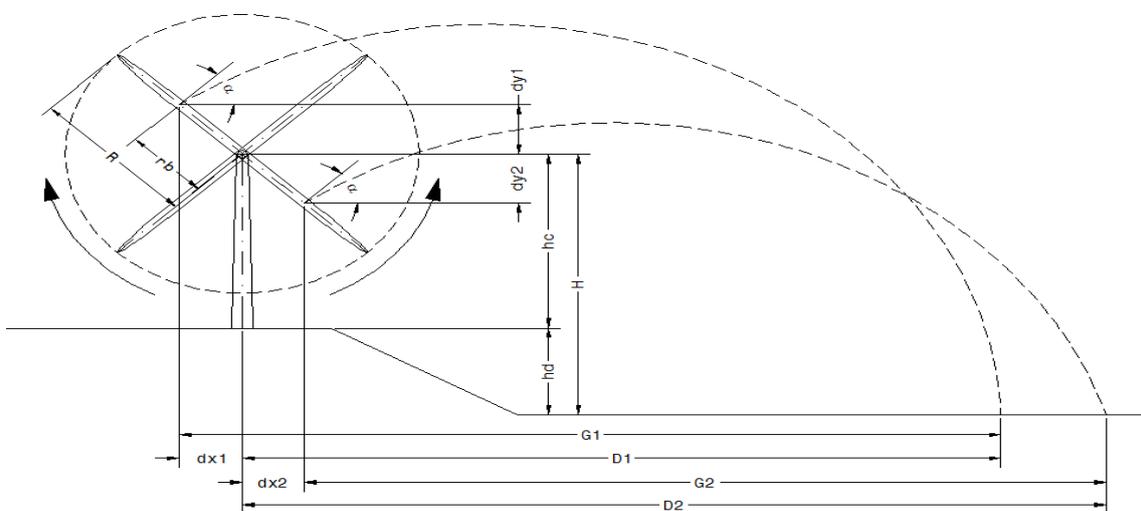
Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai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



**Figura 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 massima di funzionamento;
- vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
- assenza di effetti di "portanza" del profilo alare.



**Figura 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:

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

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

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

Pertanto, quando il corpo raggiunge terra è:

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

Ovvero:

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

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:

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

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 ma bisogna considerare che il proponente utilizzerà l'aerogeneratore in modalità di Sound Optimized Mode SO2, quindi in modalità ridotta, con un

conseguente abbassamento del numero di giri del rotore ma si è scelto comunque di utilizzare, in via cautelativa, quelli dichiarati a pieno regime nominale di potenza.

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 tempo di volo e il valore massimo di gittata del baricentro del corpo:

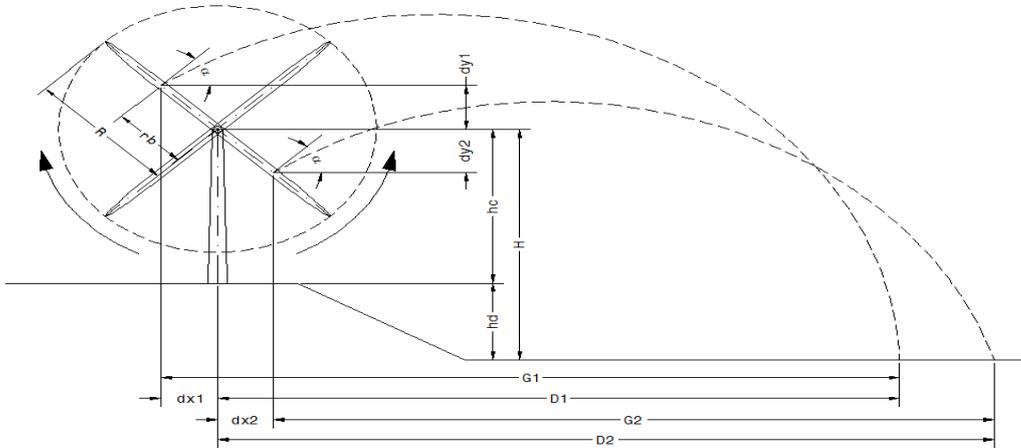
t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
0,00	-23,52	140,38
0,08	-21,22	141,85
0,15	-18,93	143,26
0,23	-16,64	144,62
0,31	-14,35	145,91
0,38	-12,05	147,15
0,46	-9,76	148,33
0,54	-7,47	149,45
0,62	-5,18	150,52
0,69	-2,88	151,52
0,77	-0,59	152,47
0,85	1,70	153,36
0,92	3,99	154,19
1,00	6,29	154,96
1,08	8,58	155,68
1,15	10,87	156,34
1,23	13,16	156,94
1,31	15,46	157,48
1,38	17,75	157,96
1,46	20,04	158,39
1,54	22,33	158,75
1,62	24,63	159,06
1,69	26,92	159,31
1,77	29,21	159,51
1,85	31,50	159,64

t2	x2	y2
[s]	[m]	[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

1,92	33,80	159,72
2,00	36,09	159,74
2,08	38,38	159,70
2,15	40,67	159,60
2,23	42,97	159,44
2,31	45,26	159,23
2,38	47,55	158,96
2,46	49,84	158,63
2,54	52,14	158,24
2,62	54,43	157,80
2,69	56,72	157,29
2,77	59,01	156,73
2,85	61,31	156,11
2,92	63,60	155,43
3,00	65,89	154,70
3,08	68,18	153,90
3,15	70,48	153,05
3,23	72,77	152,14
3,31	75,06	151,17
3,39	77,35	150,14
3,46	79,65	149,06
3,54	81,94	147,92
3,62	84,23	146,72
3,69	86,52	145,46
3,77	88,82	144,14
3,85	91,11	142,77
3,92	93,40	141,33
4,00	95,69	139,84
4,08	97,99	138,29
4,15	100,28	136,69
4,23	102,57	135,02
4,31	104,86	133,30
4,39	107,16	131,52
4,46	109,45	129,68
4,54	111,74	127,78
4,62	114,03	125,83
4,69	116,33	123,81
4,77	118,62	121,74
4,85	120,91	119,61

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

4,92	123,20	117,42	4,28	161,24	91,09
5,00	125,50	115,18	4,35	163,37	89,33
5,08	127,79	112,87	4,42	165,49	87,52
5,15	130,08	110,51	4,49	167,62	85,68
5,23	132,37	108,09	4,55	169,75	83,78
5,31	134,67	105,61	4,62	171,88	81,85
5,39	136,96	103,08	4,69	174,00	79,87
5,46	139,25	100,48	4,75	176,13	77,84
5,54	141,54	97,83	4,82	178,26	75,77
5,62	143,84	95,12	4,89	180,39	73,66
5,69	146,13	92,35	4,95	182,51	71,50
5,77	148,42	89,53	5,02	184,64	69,30
5,85	150,71	86,64	5,09	186,77	67,06
5,92	153,01	83,70	5,16	188,90	64,77
6,00	155,30	80,70	5,22	191,02	62,44
6,08	157,59	77,64	5,29	193,15	60,06
6,15	159,88	74,53	5,36	195,28	57,64
6,23	162,18	71,35	5,42	197,41	55,18
6,31	164,47	68,12	5,49	199,53	52,67
6,39	166,76	64,83	5,56	201,66	50,12
6,46	169,05	61,48	5,62	203,79	47,52
6,54	171,35	58,07	5,69	205,92	44,88
6,62	173,64	54,61	5,76	208,04	42,20
6,69	175,93	51,08	5,82	210,17	39,47
6,77	178,22	47,50	5,89	212,30	36,69
6,85	180,52	43,86	5,96	214,42	33,88
6,92	182,81	40,17	6,03	216,55	31,02
7,00	185,10	36,41	6,09	218,68	28,11
7,08	187,39	32,60	6,16	220,81	25,17
7,15	189,69	28,73	6,23	222,93	22,17
7,23	191,98	24,80	6,29	225,06	19,14
7,31	194,27	20,81	6,36	227,19	16,06
7,39	196,56	16,76	6,43	229,32	12,94
7,46	198,86	12,66	6,49	231,44	9,77
7,54	201,15	8,50	6,56	233,57	6,56
7,62	203,44	4,28	6,63	235,70	3,30
7,69	205,73	0,00	6,69	237,83	0,00



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

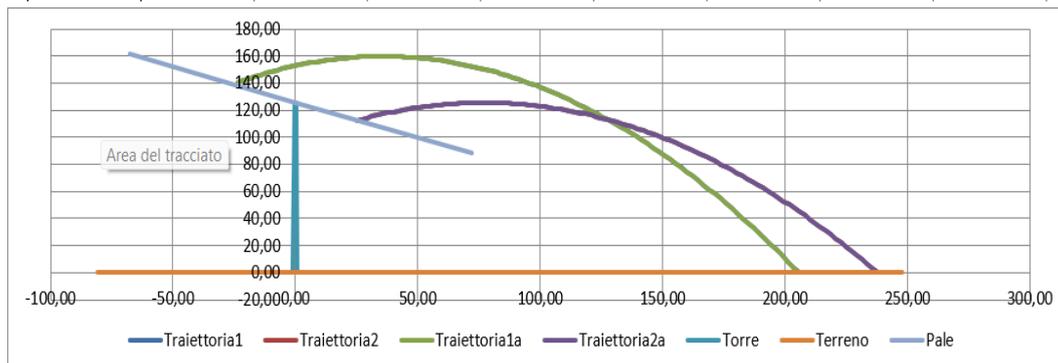
Vo	H
[m/s]	[m]
35,61	125,00

L. pala	D. rotore
[m]	[m]
79,35	162,00

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 212,75 m, con un angolo di distacco  $\alpha$  con l'orizzontale e la normale al moto 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 e cioè circa 52,9 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 6 aerogeneratori proposti su eventuali ricettori posti nelle vicinanze.



Figura 6 Inquadramento satellitare delle posizioni degli aerogeneratori proposti

La disposizione prevista per i 6 aerogeneratori oggetto di studio è riportata nella tabella sottostante in coordinate UTM WGS84.

**Tabella 1** Coordinate dei 6 aerogeneratori oggetto di studio.

Turbine	Easting	Northing
T-01	499695.00 m E	4592662.00 m N
T-02	500238.00 m E	4592586.00 m N
T-03	501471.00 m E	4591942.00 m N
T-04	499513.00 m E	4593912.00 m N
T-05	499102.00 m E	4594225.00 m N
T-06	501229.00 m E	4591648.00 m N

Di seguito si riporta l'elenco dei ricettori regolarmente censiti al Catasto Fabbricati presenti all'interno del buffer di 1 km dalle posizioni delle turbine di impianto:

**Tabella 2** Elenco ricettori regolarmente censiti nel raggio di 1000 m dagli aerogeneratori di progetto

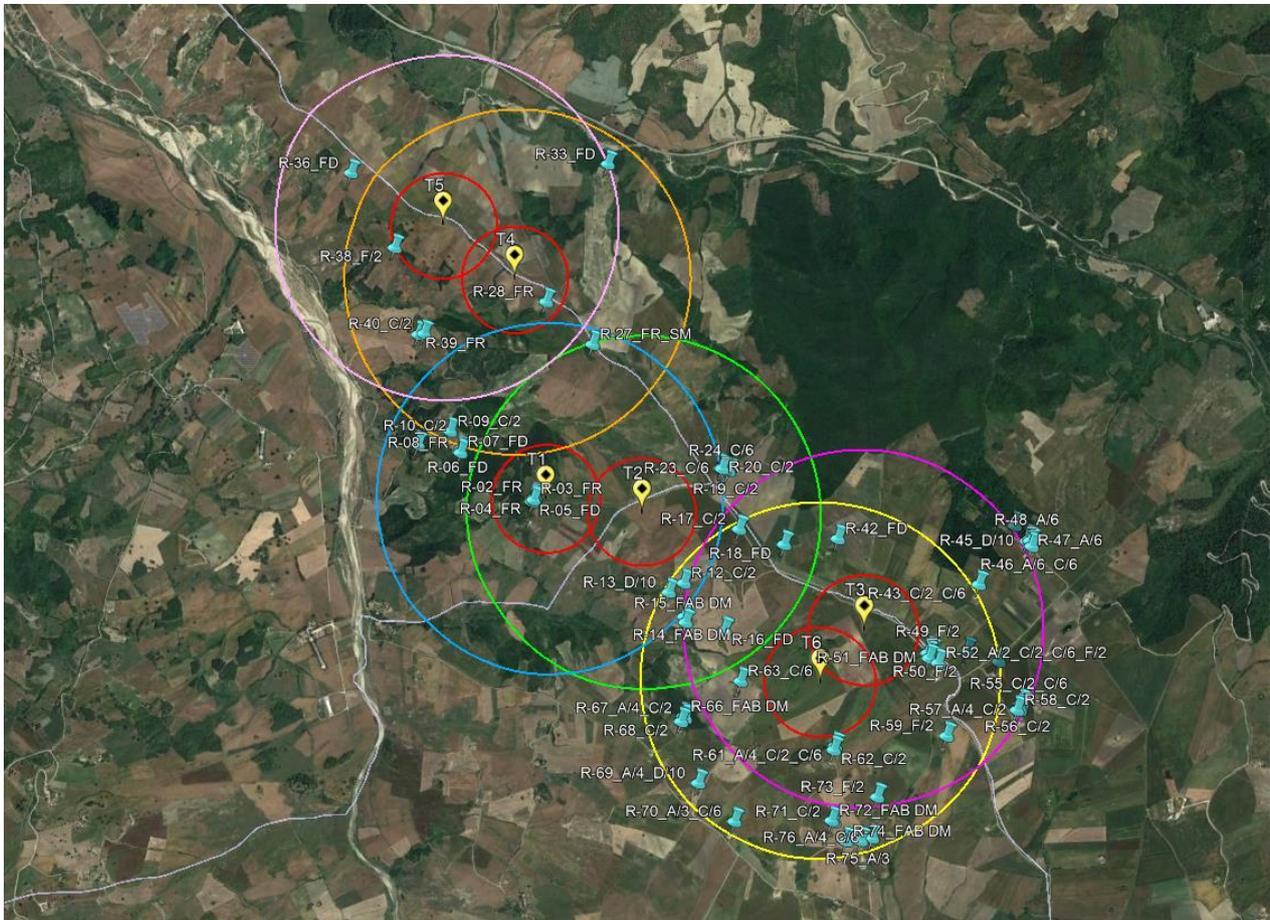
CODICE RICETTORE	COORDINATE WGS84		COMUNE	FOGLIO	PARTICELLA	CATEGORIA CATASTALE	WTG DI INFLUENZA	DISTANZA WTG (m)
R-02	499612.00 m E	4592603.00 m N	Tufara	25	81	FR	T01	107
R-03	499605.00 m E	4592594.00 m N	Tufara	25	80	FR	T01	114
R-04	499605.00 m E	4592586.00 m N	Tufara	25	79	FR	T01	120
R-05	499596.00 m E	4592577.00 m N	Tufara	25	78	FD	T01	134
R-06	499175.20 m E	4592871.35 m N	Tufara	18	83	FD	T01	571
R-07	499176.70 m E	4592860.86 m N	Tufara	18	82	FD	T01	568
R-08	499176.57 m E	4592853.54 m N	Tufara	18	17	FR	T01	563
R-09	499115.82 m E	4592976.91 m N	Tufara	17	250	C/2	T01	669
R-10	498919.25 m E	4592900.01 m N	Tufara	17	258	C/2	T01	835

R-12	500453.27 m E	4592120.88 m N	San Bartolomeo in Galdo	2	245	C/2	T02	515
R-13	500368.02 m E	4592065.74 m N	San Bartolomeo in Galdo	2	223	D/10	T02	540
R-14	500454.28 m E	4591927.60 m N	San Bartolomeo in Galdo	2	60	FAB DM	T02	706
R-15	500462.61 m E	4591894.56 m N	San Bartolomeo in Galdo	2	63	FAB DM	T02	741
R-16	500680.08 m E	4591853.07 m N	San Bartolomeo in Galdo	2	83	FD	T06	600
R-17	500761.06 m E	4592428.73 m N	San Bartolomeo in Galdo	2	221	C/2	T02	549
R-18	501010.65 m E	4592344.17 m N	San Marco la Catola	29	151	FD	T03	610
R-19	500701.54 m E	4592753.40 m N	San Marco la Catola	29	258	C/2	T02	493
R-20	500662.99 m E	4592771.24 m N	San Marco la Catola	29	260	C/2	T02	463
R-21	500676.25 m E	4592776.05 m N	San Marco la Catola	29	261	A/4	T02	478
R-22	500674.68 m E	4592770.85 m N	San Marco la Catola	29	263	A/4	T02	472
R-23	500666.43 m E	4592765.61 m N	San Marco la Catola	29	264	C/6	T02	466
R-24	500677.25 m E	4592759.78 m N	San Marco la Catola	29	265	C/6	T02	473
R-25	500669.99 m E	4592776.44 m N	San Marco la Catola	29	266	A/4	T02	469
R-26	500668.23 m E	4592770.29 m N	San Marco la Catola	29	267	C/6	T02	474
R-27	499938.27 m E	4593466.91 m N	Tufara	17	78	FR_SM	T04	631
R-28	499671.72 m E	4593712.78 m N	Tufara	17	3	FR	T04	207
R-33	500015.76 m E	4594512.21 m N	San Marco la Catola	29	137	FD	T04	783

R-36	498545.29 m E	4594460.28 m N	Tufara	10	48	FD	T05	604
R-38	498795.73 m E	4594030.81 m N	Tufara	10	211	F/2	T05	372
R-39	498923.18 m E	4593534.33 m N	Tufara	17	18	FR	T04	710
R-40	498957.00 m E	4593539.00 m N	Tufara	17	260	C/2	T04	680
R-42	501308.66 m E	4592376.26 m N	San Marco la Catola	29	125	FD	T03	462
R-43	502089.43 m E	4592122.80 m N	Volturara Appula	15	280	C/2 C/6	T03	644
R-44	502292.38 m E	4592449.14 m N	Volturara Appula	15	283	C/6	T03	964
R-45	502357.77 m E	4592363.32 m N	Volturara Appula	15	287	D/10	T03	979
R-46	502384.75 m E	4592334.42 m N	Volturara Appula	15	291	A/6 C/6	T03	995
R-47	502375.70 m E	4592364.76 m N	Volturara Appula	15	292	A/6	T03	993
R-48	502371.26 m E	4592373.44 m N	Volturara Appula	15	288	A/6	T03	998
R-49	501819.97 m E	4591754.73 m N	San Bartolomeo in Galdo	3	46	F/2	T03	405
R-50	501803.55 m E	4591742.40 m N	San Bartolomeo in Galdo	3	47	F/2	T03	395
R-51	501810.86 m E	4591715.12 m N	San Bartolomeo in Galdo	3	21	FAB DM	T03	418
R-52	501861.68 m E	4591688.84 m N	San Bartolomeo in Galdo	3	54	A/2 C/2 C/6 F/3	T03	477
R-53	502022.14 m E	4591753.55 m N	Volturara Appula	15	294	F/2	T03	592
R-54	502200.39 m E	4591694.11 m N	Volturara Appula	16	190	A/4 C/2 C/6	T03	785
R-55	502327.75 m E	4591461.41 m N	Volturara Appula	16	173	C/2 C/6	T03	982
R-56	502321.97 m E	4591432.05 m N	Volturara Appula	16	211	C/2	T03	992

R-57	502316.06 m E	4591422.63 m N	Volturara Appula	16	8	A/4 C/2	T03	991
R-58	502302.61 m E	4591422.28 m N	Volturara Appula	16	210	C/2	T03	981
R-59	501912.39 m E	4591278.02 m N	San Bartolomeo in Galdo	7	24	F/2	T06	795
R-61	501293.15 m E	4591220.30 m N	San Bartolomeo in Galdo	6	77	A/4 C/2 C/6	T06	443
R-62	501286.16 m E	4591198.20 m N	San Bartolomeo in Galdo	6	82	C/2	T06	462
R-63	500770.72 m E	4591571.86 m N	San Bartolomeo in Galdo	2	239	C/69	T06	477
R-66	500450.91 m E	4591370.57 m N	San Bartolomeo in Galdo	2	159	FAB DM	T06	842
R-67	500459.01 m E	4591361.19 m N	San Bartolomeo in Galdo	2	236	A/4 C/2	T06	834
R-68	500437.97 m E	4591342.92 m N	San Bartolomeo in Galdo	2	237	C/2	T06	865
R-69	500534.55 m E	4591000.81 m N	San Bartolomeo in Galdo	2	219	A/4 D/10	T06	962
R-70	500737.63 m E	4590780.21 m N	San Bartolomeo in Galdo	6	75	A/3 C/6	T06	999
R-71	501289.09 m E	4590788.72 m N	San Bartolomeo in Galdo	6	89	C/2	T06	868
R-72	501278.67 m E	4590795.87 m N	San Bartolomeo in Galdo	6	43	FAB DM	T06	860
R-73	501532.54 m E	4590928.25 m N	San Bartolomeo in Galdo	6	73	F/2	T06	790

R-74	501359.71 m E	4590675.27 m N	San Bartolomeo in Galdo	10	78	FAB DM	T06	992
R-75	501442.39 m E	4590677.70 m N	San Bartolomeo in Galdo	10	118	A/3	T06	999
R-76	501507.24 m E	4590691.73 m N	San Bartolomeo in Galdo	7	33	A/4 C/6	T06	999



**Figura 7** *Disposizione dei ricettori (tabella 2) rispetto le Turbine con relativi buffer di 300 e 1000 metri*

In prima battuta, per restringere il campo d'indagine, tra tutti quelli censiti nelle aree di impianto, sono stati selezionati

quelli che vengono a trovarsi all'interno del primo livello di buffer (300 m) visto che comunque la gittata, precedentemente calcolata nel “worst case”, non supera tale valore.

Nella seguente tabella si riportano i ricettori ricadenti in tale buffer:

**Tabella 3** Elenco ricettori regolarmente censiti nel raggio di 300 m dagli aerogeneratori

CODICE RICETTORE	COORDINATE WGS84		COMUNE	FOGLIO	PARTICELLA	CATEGORIA CATASTALE	WTG DI INFLUENZA	DISTANZA WTG (m)
R-02	499612.00 m E	4592603.00 m N	Tufara	25	81	FR	T01	107
R-03	499605.00 m E	4592594.00 m N	Tufara	25	80	FR	T01	114
R-04	499605.00 m E	4592586.00 m N	Tufara	25	79	FR	T01	120
R-05	499596.00 m E	4592577.00 m N	Tufara	25	78	FD	T01	134
R-28	499671.72 m E	4593712.78 m N	Tufara	17	3	FR	T04	207

Solo 5 tra tutti i ricettori ricadono all'interno del raggio d'azione dei 300 m e quindi potrebbero essere definiti “ricettori sensibili”.

Tra questi possono ancora essere eliminati i ricettori che riportano la categoria catastale “FD” in quanto “fabbricati diruti”. Questa categoria va attribuita a immobili diroccati, ai ruderi, ovvero ai beni immobili caratterizzati da notevole livello di degrado che ne determina l'assenza di autonomia funzionale e l'incapacità reddituale, temporalmente rilevante quindi, a ragion veduta, possono essere considerati oltre che non abitabili anche inutilizzabili per qualsiasi attività che prevede una qualche presenza umana.

Questa ulteriore considerazione permette di ridurre a 4 il numero dei ricettori oggetto di studio elencati di seguito con indicazione dell'esatta distanza dall'aerogeneratore più vicino:

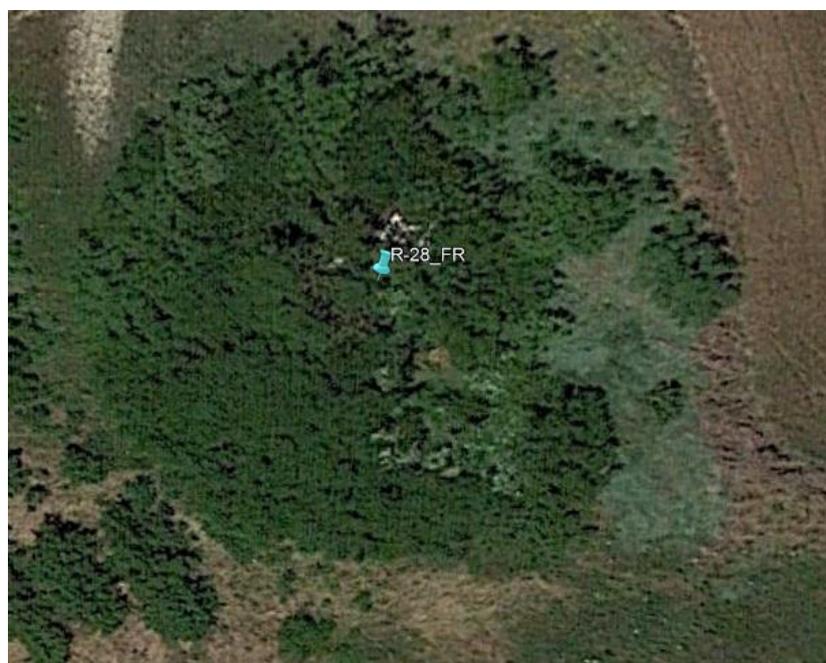
**Tabella 4** Elenco ricettori regolarmente censiti nel raggio di 300 m con esatta distanza dagli aerogeneratori

CODICE RICETTORE	COORDINATE WGS84		COMUNE	FOGLIO	PARTICELLA	CATEGORIA CATASTALE	WTG DI INFLUENZA	DISTANZA WTG (m)
R-02	499612.00 m E	4592603.00 m N	Tufara	25	81	FR	T01	107
R-03	499605.00 m E	4592594.00 m N	Tufara	25	80	FR	T01	114
R-04	499605.00 m E	4592586.00 m N	Tufara	25	79	FR	T01	120
R-28	499671.72 m E	4593712.78 m N	Tufara	17	3	FR	T04	207

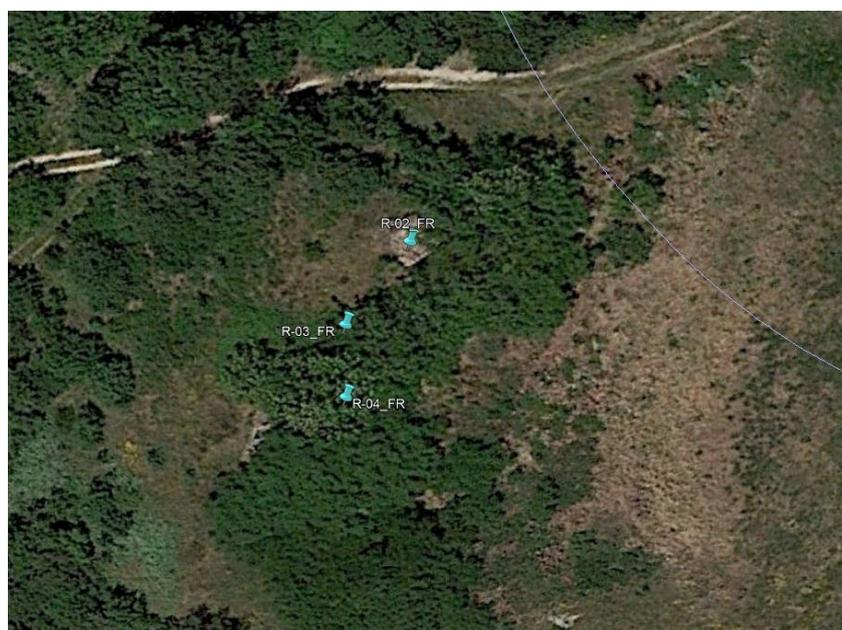


**Figura 8** Disposizione dei ricettori (tabella 4) rispetto le Turbine con relativo buffer di 300 metri

A seguire l'individuazione satellitare dei 4 ricettori:



**Figura 9** Ricettore R-28



**Figura 10** Ricettori R-02, R-03 e R-04

	<b>PARCO EOLICO DI “TUFARA”</b> RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI E ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI	 Ingegneria & Innovazione	
		28/03/2022	REV: 1

Lo studio nel Real Case prevede la scelta del ricettore sensibile che presenta quella combinazione di fattori che lo rende più vulnerabile rispetto agli altri come, per esempio, verifica della categoria catastale e verifica visiva eseguita durante i sopralluoghi per accertarne la presenza umana, vicinanza al relativo aerogeneratore e posizione altimetrica rispetto a quest'ultimo. Nel caso in esame tutti i ricettori presi in esame, anche se risultano catastalmente “fabbricati rurali”, in realtà sono diruti e abbandonati da anni, infatti, dalle immagini precedenti rappresentanti la vista satellitare degli stessi, si può facilmente notare come essi siano stati quasi completamente fagocitati dalla vegetazione circostante.

In definitiva possiamo sicuramente affermare di non avere ricettori sensibili all'interno del buffer in cui sembrerebbe verificarsi l'eventuale impatto in Worst Case.

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.

Inoltre, come evidenziato dalla seguente tabella, non si ha alcuna interferenza né con Strade Provinciali né con Strade Statali essendo che la più vicina all'impianto si trova a circa 206 metri di distanza.

**Tabella 5** 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
<b>T-01</b>	2.070	SS 17
<b>T-02</b>	2.030	SS 17
<b>T-03</b>	1.900	SS 369
<b>T-04</b>	1.020	SS 17
<b>T-05</b>	940	SS 17
<b>T-06</b>	2.200	SS 369

#### 6.4. Probabilità di accadimento

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

Lo scopo sarebbe quello di ridurre i danni, derivanti da tali installazioni, sino ad un rischio residuale tecnico non eliminabile od accettabile. Nelle considerazioni entrerebbero sostanzialmente, se non esclusivamente, i requisiti di sicurezza che l'impianto deve assicurare in tutte le fasi della propria vita (realizzazione, esercizio e dismissione). È ovvio che sono le prime due a farla da padrone. In mancanza di siffatte prescrizioni è prassi riferirsi ad una probabilità di rottura di 1006 eventi all'anno. Il dato numerico va inteso come un limite di soglia da raggiungere o da applicare. È stato per molto tempo il valore di accettabilità o di credibilità incidentale degli impianti nucleari, che prima di tutti e più di tutti hanno fatto della sicurezza il punto essenziale della loro esistenza. È naturale che se in un dato periodo di tempo, che è solitamente riferito ad un anno, non si verificano eventi incidentali di quel tipo che si sta considerando, la relativa probabilità di rottura assumerà il valore limite che si è appena indicato, cioè 1006 eventi/anno. È ovvio che il valore del danno statistico della rottura di una torre per un convertitore eolico abbia singolarmente una probabilità maggiore. Essendo il processo di rottura della torre il risultato di una catena di eventi, la probabilità totale spettante a tale evento sarà la combinazione delle probabilità dei meccanismi intermedi attraverso i quali si perviene al risultato. Ogni evento individuale della catena è visto con le sue conseguenze in modo che il prodotto della probabilità di occasione di ogni individuale evento fornisce la relativa probabilità di danno. Questo valore può essere messo in relazione con il valore di soglia, che dipende dall'oggetto individuale da proteggere. La relazione, che traduce il concetto ora esposto, si basa sulla seguente disuguaglianza.

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

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

- $P_{so}$  è il valore di soglia, che è relativo all'oggetto da difendere e che in linea generale potrebbe essere corrispondente al dato già discusso in precedenza e cioè pari a 1006 o ben maggiore;
- $P_1$  è la probabilità di occasione dell'evento incidentale accaduto alla turbina eolica;
- $P_2$  è la probabilità di occasione dell'urto tra l'oggetto da proteggere e la pala;
- $P_3$  è la probabilità di occasione della condizione di vento sfavorevole o dei condizionamenti ambientali;
- $P_4$  la probabilità di occasione relativa ad altre cause, come tolleranze di costruzione, etc.

In conclusione, in relazione al rischio di rottura, si riportano le risultanze del documento "Analysis Of 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 volte in un anno) con la probabilità di rottura del primo sistema di frenata ( $10^{-3}$  per intervento) e del secondo sistema di frenata ( $10^{-3}$  per intervento) e per la probabilità di rottura della pala in queste condizioni (100%).

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

Frequenza di rottura e massima gittata segnalata

## 7. CONCLUSIONI

In conclusione, la rottura accidentale di un elemento rotante con conseguente lancio di elementi a distanza dall'aerogeneratore stesso ha una probabilità di accadimento remota ma non impossibile. Nel presente studio la gittata dell'elemento che si suppone possa staccarsi dall'aerogeneratore è stata ipotizzata e calcolata in Worst Case, condizione estremamente generica e sfavorevole che trova poca rispondenza con la realtà dell'evento fisico in oggetto. I risultati hanno portato il luogo dell'ipotizzato e sfortunato impatto dell'elemento rotante a circa 290 m di distanza dall'aerogeneratore e quindi ad una distanza da considerarsi ampiamente in sicurezza dal ricettore sensibile o dall'asse stradale statale/provinciale più vicino.

Bisogna comunque considerare che in Real Case, applicando alcune semplici considerazioni derivanti dalla contestualizzazione dell'evento e riportando, quindi, le ipotesi di calcolo quanto più vicine possibile alla realtà, il valore calcolato in Worst Case si porterebbe sensibilmente al ribasso aumentando ulteriormente le condizioni di sicurezza in sito.