



REGIONE
CAMPANIA



PROVINCIA DI
AVELLINO



COMUNE
DI CONZA DELLA
CAMPANIA



PROVINCIA DI
SALERNO



COMUNE DI
SANTOMENNA



COMUNE DI
CASTELNUOVO
DI CONZA



REGIONE
BASILICATA



PROVINCIA DI
POTENZA



COMUNE DI
PESCOPAGANO

OGGETTO:

PROGETTO DEFINITIVO

"IMPIANTO DI PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA NEL
COMUNE DI PESCOPAGANO (PZ) DENOMINATO "SAETTA" DI POTENZA
NOMINALE PARI A 72 MW

ELABORATO:

RELAZIONE SPECIALISTICA - ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI



PROPONENTE:

W.E.B

**WEB ITALIA ENERGIE
RINNOVABILI S.R.L.**

Via Leonardo da Vinci n.15
39100 Bolzano (BZ)
C.F.: 10171591000
Rappresentante impresa: Kainz Reinhard

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT

VIA VERRASTRO 15/A
85100- POTENZA (PZ)
www.egmproject.it
egmproject@pec.it

**Direttore Tecnico
Ing. Carmen Martone**


Gruppo di Lavoro:
Geol. Raffaele Nardone
Ing. Antonio Romano
Dott.Arch. Martina Lo Vaglio
Ing. Michele Martocchia
Dott.Ing. Donatella Guglielmi
Dott.For. Nicoletta Tedesco
Geom. Gerardo Gioioso

Amministratore: Nunzio Russoniello
Responsabile tecnico: Samanta Petrozzino



VIA CESARE BATTISTI, 116
83053 - S. ANDREA DI CONZA (AV)

Livello prog.	Cat. opera	Numero elaborato	Tipo elaborato	N° foglio	Tot. fogli	Nome file	Scala
PD		A.7	R			A.7_Analisi_rottura_organ_i_rotanti	
REV.	DATA	DESCRIZIONE			ESEGUITO	VERIFICATO	APPROVATO
00	Maggio 2024	EMISSIONE				Ing. Carmen Martone	Geol. Raffaele Nardone

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024</p> <p>Pag. 1 di 31</p>
---	---	---

Sommario

1. PREMESSA	3
1.1 Scopo del documento.....	3
2. DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO.....	4
2.1 Iniziativa	9
2.2 Attenzione per l’ambiente	10
3. TIPOLOGIE DI INCIDENTI	10
4. ROTTURA ELEMENTI ROTANTI	11
5. FORZE AGENTI SULLA TRAIETTORIA.....	15
6. ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE E CALCOLO GITTATA IN WORST CASE...16	
6.1 Geometria del problema e calcolo della gittata (1° caso).....	20
6.2 Calcolo della gittata massima	22
7. CONCLUSIONI.....	28



	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024</p> <p>Pag. 2 di 31</p>
---	---	---

Figura 1 - Inquadramento area parco eolico su base ortofoto	5
Figura 2 - Inquadramento area parco eolico su catastale	6
Figura 3 - Inquadramento area parco e sottostazione su CTR	7
Figura 4 - Inquadramento area parco e sottostazione su IGM	8
Figura 5 - Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica	15
Figura 6 - Composizione di una pala	16
Figura 7 - Disposizione della navicella	17
Figura 8 – Dettagli dell’attacco di una pala al mozzo	18
Figura 9 – Esempio Aerogeneratore	19
Figura 10 - Schema grafico di gittata	21
Figura 11 – Punto di Rottura della pala	23
Figura 12 – Rappresentazione grafica rottura	23
Figura 13 – Verifica gittata massima	30
Tabella 1 – Fogli e particelle aerogeneratori.....	9
Tabella 2 – Caratteristiche principali dell’aerogeneratore previsto nel parco eolico.....	12
Tabella 3 - Gittata con velocità di distacco 24 m/s	24
Tabella 4 - Valori della gittata con evidenziata quella massima.....	28

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024</p> <p>Pag. 3 di 31</p>
---	---	---

1. PREMESSA

1.1 Scopo del documento

Con il Decreto Legislativo 29 dicembre 2003, n. 387, il Parlamento Italiano ha proceduto all'attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità.

Con la nuova normativa introdotta dal d.lgs. 30 giugno 2016, n. 127 (legge Madia), la conferenza dei servizi si potrà svolgere in modalità "Sincrona" o "Asincrona", nei casi previsti dalla legge.

Nel caso specifico, l'iter di VIA si configura come un endo-procedimento della procedura di Autorizzazione Unica ai sensi del D.lgs. 29 dicembre 2003. In data 21 luglio 2017 è entrato in vigore il d. lgs. n. 104 del 16 giugno 2017 (pubblicato in G.U. n. 156 del 06/06/2017), il quale ha modificato la disciplina inserita nel D.lgs. n.152/2006 in tema di Valutazione di Impatto ambientale (VIA).


Il provvedimento trae origine da un adeguamento nazionale alla normativa europea prevista dalla Direttiva 2014/52/UE del 16 aprile 2014, la quale ha modificato la Direttiva 2011/92/UE concernente la valutazione dell'impatto ambientale di determinati progetti pubblici e privati. Scopo del provvedimento in esame è quello di rendere più efficiente le procedure amministrative nonché di innalzare il livello di tutela ambientale.

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse.

Tuttavia, al fine della sicurezza, la stima della gittata massima di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico.

In linea con l'orientamento mondiale, la società WEB ITALIA ENERGIE RINNOVABILI S.R.L. intende realizzare nei comuni di Pescopagano (PZ), Santomena (SA), Castelnuovo di Conza (SA) e Conza della Campania (AV), un parco eolico della potenza nominale di 72 MW.

Il parco in progetto sarà costituito da 10 aerogeneratori e relative opere accessorie, ovvero la realizzazione della viabilità di accesso al parco, ove non esistente e/o non idonea al trasporto dei componenti delle torri, la posa del cavidotto interno di collegamento tra gli aerogeneratori, la posa del cavidotto di collegamento

	<p style="text-align: center;">PROGETTO DEFINITIVO</p> <p style="text-align: center;">"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p style="text-align: center;">Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p style="text-align: center;">DATA: MAGGIO 2024</p> <p style="text-align: center;">Pag. 4 di 31</p>
---	---	---

tra il parco eolico e la presente Stazione Elettrica (SE) di Terna che permetterà l'immissione dell'energia elettrica prodotta alla dorsale nazionale.

Il progetto è finalizzato alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, in linea con la Strategia Energetica Nazionale (SEN).

2. DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO

Il progetto in esame proposto dalla società WEB ITALIA ENERGIE RINNOVABILI S.R.L. (di seguito "Committenza") interessa un'area a sud del comune di Pescopagano (PZ).

Il parco eolico denominato "Saetta" è composto da 10 aerogeneratori, che ricadono completamente nel territorio comunale di Pescopagano (PZ), in Basilicata, mentre il cavidotto per il collegamento del parco eolico alla SE, si estende anche nel territorio regionale della Campania e più precisamente nel Comune di Santomenna (SA), Conza della Campania (AV) e Castelnuovo di Conza (SA), quest'ultimi ove ricade anche la Stazione Elettrica (SE) di raccolta e controllo.

L'area di progetto su cui verrà realizzato il parco eolico è caratterizzata da orografia tipica delle zone montane e sub-montane locali, con un'altezza media compresa tra 940 e 1140 metri sul livello del mare.

L'area in cui è prevista l'installazione del parco eolico rappresenta un mosaico composto da aree agricole utilizzate per la coltivazione di seminativi, tra cui cereali per la produzione di granella, legumi secchi, patate e foraggere avvicendate. Si alternano a tali aree ampie zone di pascoli ed incolti che si fondono con arbusteti e macchia, incorniciati da querceti e boschi di altre latifoglie mesofile e mesotermofile e piantagioni di conifere.

Le turbine saranno posizionate lungo la direzione prevalente del vento ossia SSW.

Per effettuare una localizzazione univoca dei terreni sui quali insiste il parco eolico, di seguito si riportano le cartografie riguardanti:

- sovrapposizione del parco eolico su ortofoto (figura 1);
- sovrapposizione del parco eolico su catastale (figura 2);
- sovrapposizione del parco eolico su CTR (figura 3);
- sovrapposizione del parco eolico su IGM (figura 4).

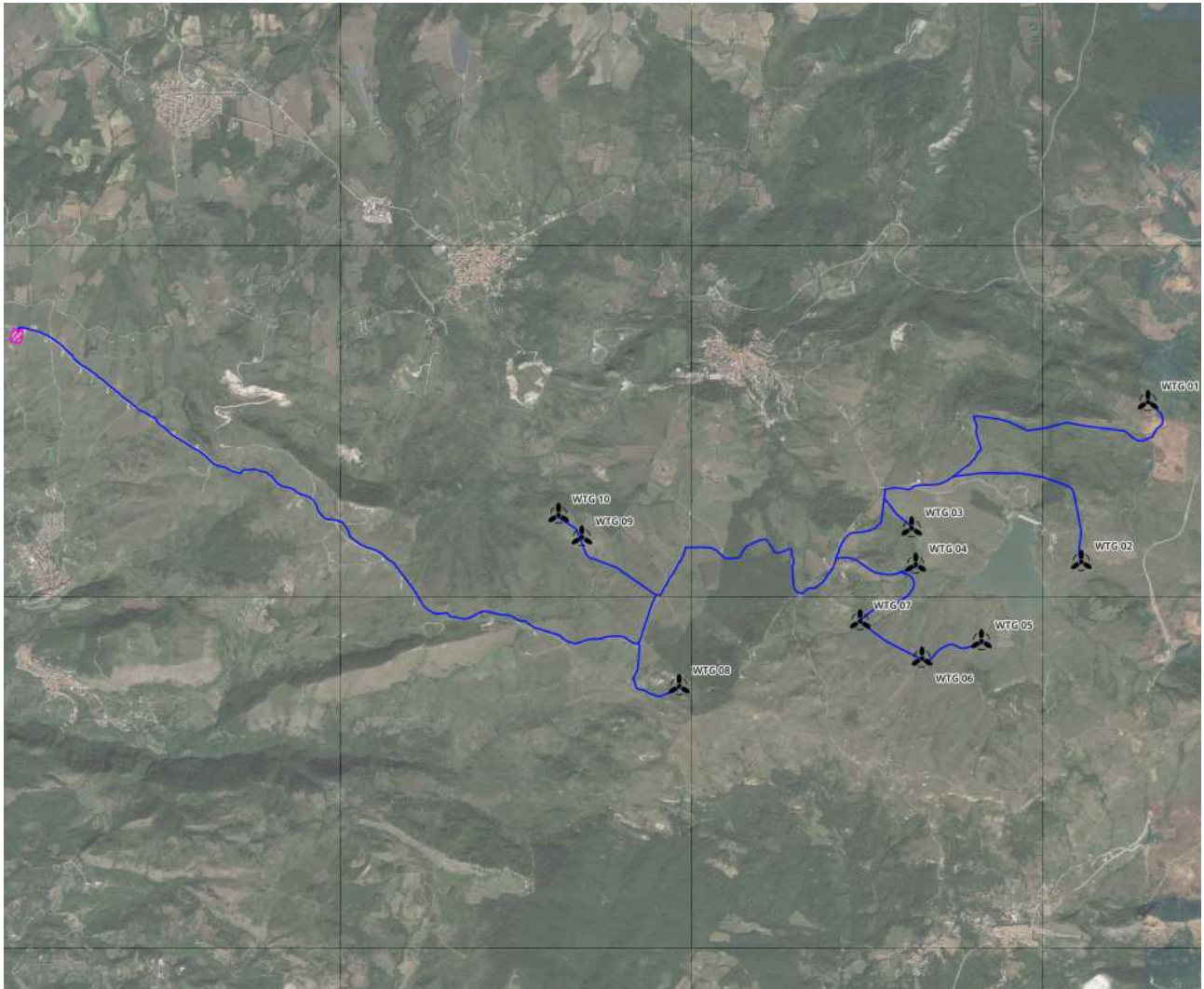


Figura 1 - Inquadramento area parco eolico su base ortofoto

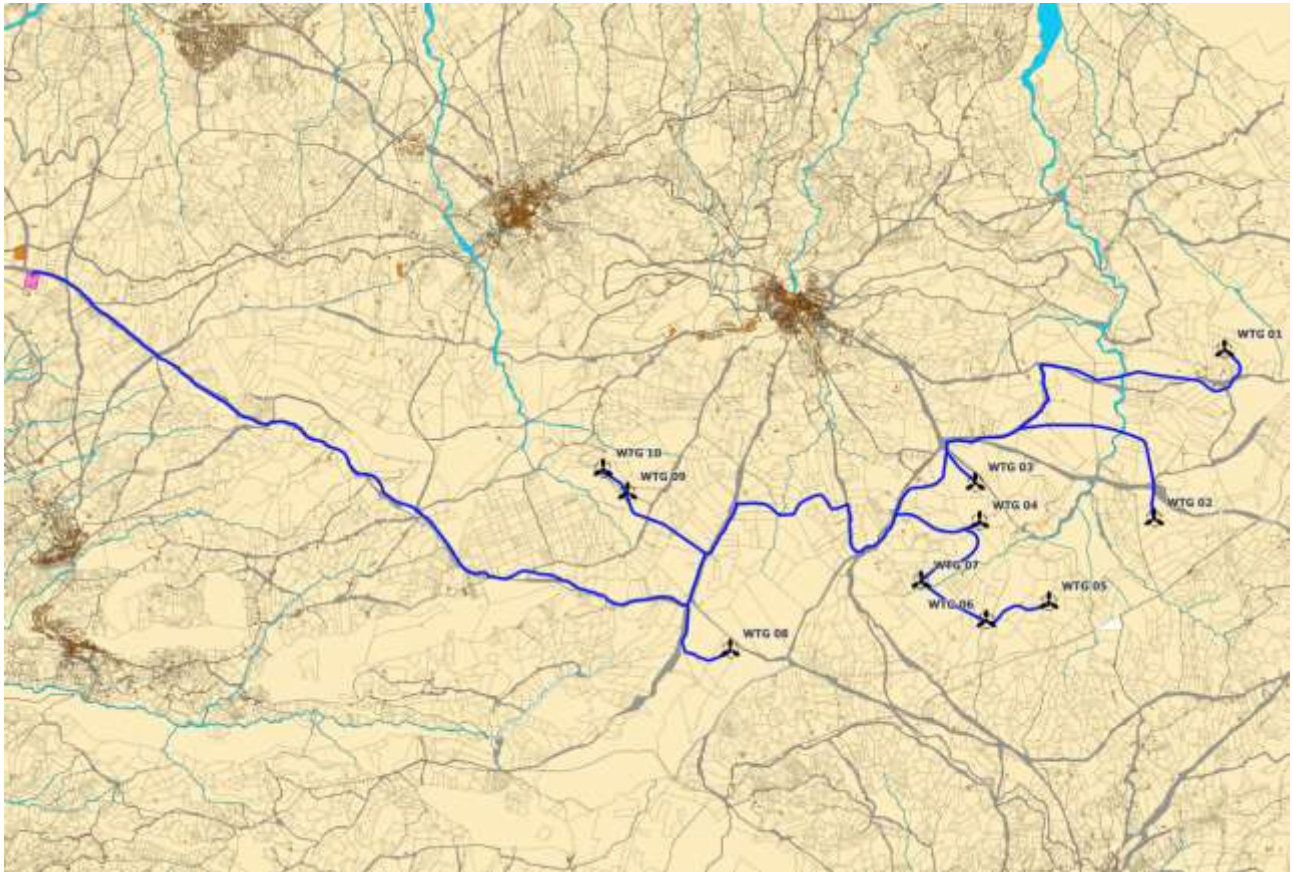


Figura 2 - Inquadramento area parco eolico su catastale



Figura 3 - Inquadramento area parco e sottostazione su CTR

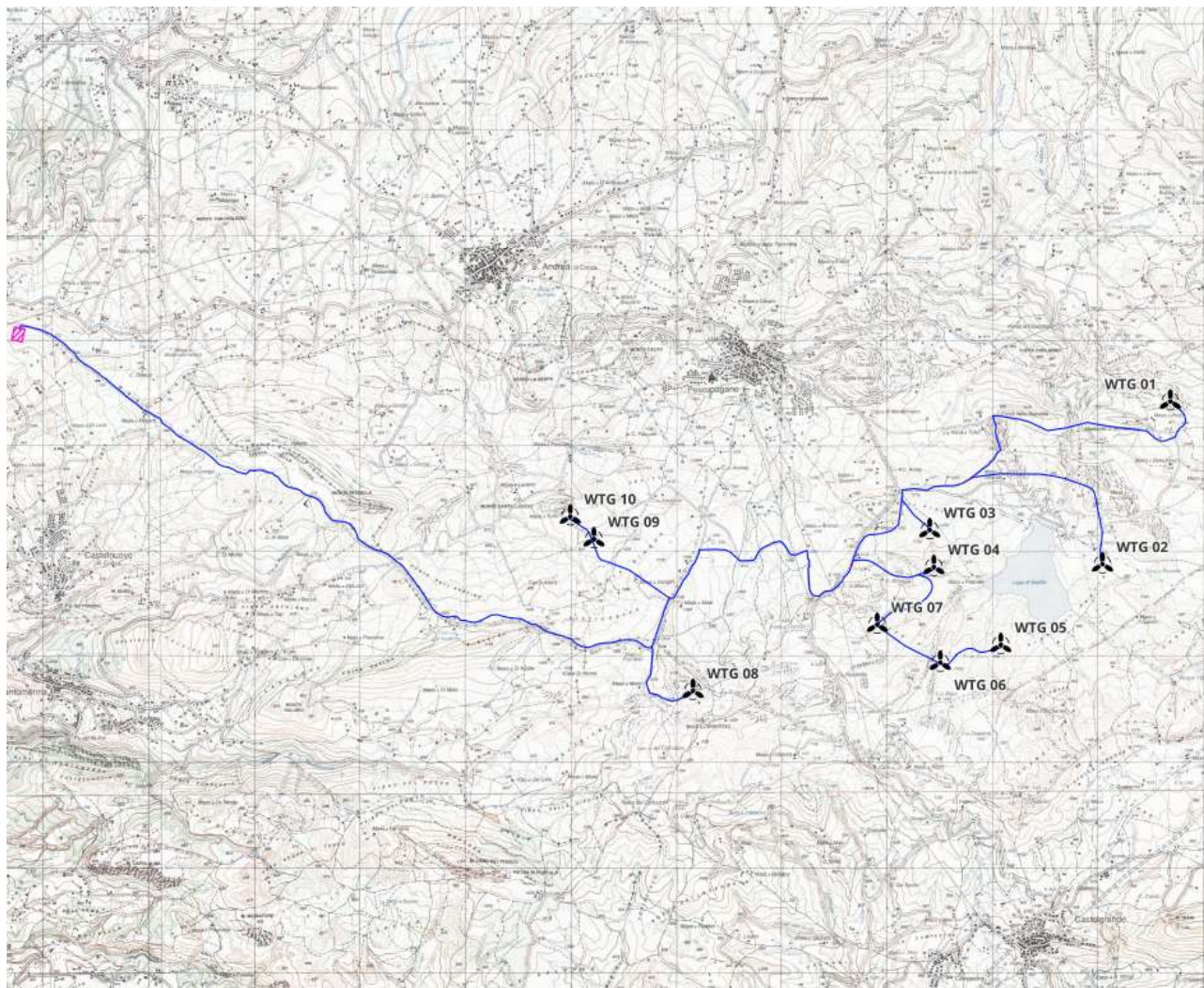



Figura 4 - Inquadramento area parco e sottostazione su IGM

Il parco eolico per la produzione di energia elettrica oggetto di studio avrà le seguenti caratteristiche:

- potenza installata totale: 72 MW;
- potenza della singola turbina: 7,2 MW;
- n. 10 turbine;
- n. 3 cabina di raccolta e smistamento;
- n. 1 SE.

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024</p> <p>Pag. 9 di 31</p>
---	---	---

I fogli e le particelle interessati dall'installazione dei nuovi aerogeneratori sono sintetizzati nella Tabella seguente.

Aerogeneratore	Foglio	Particella
WTG01	35	72
WTG 02	44	33
WTG 03	52	5
WTG 04	52	106
WTG05	53	23
WTG 06	54	24
WTG 07	54	33
WTG 08	56	101
WTG 09	48	99
WTG 10	48	7


Tabella 1 – Fogli e particelle aerogeneratori

2.1 Iniziativa

Con la realizzazione dell'impianto, denominato "Saetta", si intende conseguire un significativo risparmio energetico, mediante il ricorso alla fonte energetica rinnovabile rappresentata dal vento, tale tecnologia nasce dall'esigenza di coniugare:

- ✓ la compatibilità con esigenze paesaggistiche e di tutela ambientale;
- ✓ nessun inquinamento acustico;
- ✓ un risparmio di combustibile fossile;
- ✓ una produzione di energia elettrica senza emissioni di sostanze inquinanti.

Il progetto mira a contribuire al soddisfacimento delle esigenze di "Energia Verde" e allo "Sviluppo Sostenibile" invocate dal Protocollo di Kyoto, dalla Conferenza sul clima e l'ambiente di Copenaghen 2009 e dalla Conferenza sul clima di Parigi del 2015.

	<p style="text-align: center;">PROGETTO DEFINITIVO</p> <p style="text-align: center;">"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p style="text-align: center;">Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p style="text-align: center;">DATA: MAGGIO 2024 Pag. 10 di 31</p>
---	---	---

2.2 Attenzione per l'ambiente

Ad oggi, la produzione di energia elettrica è per la quasi totalità proveniente da impianti termoelettrici che utilizzano combustibili sostanzialmente di origine fossile.

L'Italia non possiede riserve significative di fonti fossili, ma da esse ricava circa il 90% dell'energia che consuma, con una rilevante dipendenza dall'estero. I costi della bolletta energetica, già alti, per l'aumento della domanda internazionale rischiano di diventare insostenibili per la nostra economia con le sanzioni previste in caso di mancato rispetto degli impegni di Kyoto, Copenaghen e Parigi.

La transizione verso un mix di fonti di energia e con un peso sempre maggiore di rinnovabili è, pertanto, strategica per un Paese come il nostro dove, tuttavia, le risorse idrauliche e geotermiche sono già sfruttate appieno.

Negli ultimi 10 anni grazie agli incentivi sulle fonti rinnovabili lo sviluppo delle energie verdi nel nostro paese ha subito un notevole incremento soprattutto nel fotovoltaico e nell'eolico, portando l'Italia tra i paesi più sviluppati dal punto di vista dell'innovazione energetica e ambientale.

La conclusione di detti incentivi ha frenato lo sviluppo soprattutto dell'eolico, creando notevoli problemi all'economia del settore.


La società proponente WEB ITALIA ENERGIE RINNOVABILI S.R.L., con sede a Bolzano (BZ) in via Leonardo da Vinci 15, si pone come obiettivo di attuare la "grid parity" nell'eolico, grazie all'installazione di impianti di elevata potenza, nuovi aerogeneratori, che abbattano i costi fissi e rendono l'energia prodotta dell'eolico conveniente e sullo stesso livello delle energie prodotte dalle fonti fossili.

3. 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.

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024</p> <p>Pag. 11 di 31</p>
---	---	--

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.

Individuate le possibili cause e limitando l'analisi alle tipologie di incidenti legati 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 di nostro interesse è la rottura degli elementi rotanti come distacco di un'intera pala.

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.

4. ROTTURA ELEMENTI ROTANTI

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.

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024 Pag. 12 di 31</p>
---	---	---

Nella trattazione che segue si adopereranno delle semplificazioni come, per 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 varrà tenuto conto della presenza dell'aria che genera comunque delle forze di resistenza viscosa 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.

L'aerogeneratore previsto per la realizzazione del parco eolico è una turbina da 7,2 MW; nella tabella che segue sono sintetizzate le principali caratteristiche dell'aerogeneratore previsto nel parco eolico.

Altezza al Mozzo	138 m
Diametro Rotore	172 m
Lunghezza singola Pala	86 m
Numero Pale	3
Velocità di Rotazione Max a regime del Rotore	8 rpm
Potenza Nominale Turbina	7200 kW

Tabella 2 – Caratteristiche principali dell'aerogeneratore previsto nel parco eolico

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024</p> <p>Pag. 13 di 31</p>
---	---	--

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 potrebbe verificarsi è del tipo "Rottura alla Radice".

Il rischio è considerato in questo contesto come combinazione di due fattori:

- ✓ la probabilità che possa accadere un determinato evento;
- ✓ la probabilità che tale evento abbia conseguenze sfavorevoli.


Durante il funzionamento dell'impianto, il più grande rischio è dovuto alla caduta di oggetti dall'alto, queste cadute possono essere dovute:

- ✓ pezzi di ghiaccio formatisi sulla pala;
- ✓ rottura accidentale di pezzi meccanici in rotazione.

Per ciò che concerne la prima tipologia di evento, vista la latitudine dell'area di progetto e le caratteristiche climatiche, la sua probabilità si può considerare trascurabile.

Per ciò che riguarda la seconda tipologia è bene evidenziare che:

- il collegamento rigido tra le pale ed il mozzo limita sino a quasi ad annullare il rischio di distacco di una pala;
- le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro e carbonio rinforzato con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche: l'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi ad annullare la probabilità di distacco di parti meccaniche in rotazione: anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono di fatto unita in un unico pezzo (seppure gravemente danneggiato);

	<p style="text-align: center;">PROGETTO DEFINITIVO</p> <p style="text-align: center;">"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p style="text-align: center;">Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p style="text-align: right;">DATA: MAGGIO 2024 Pag. 14 di 31</p>
---	---	--

- gli aerogeneratori sono dotati di un sistema di supervisione e controllo pale. Il sistema di controllo è basato su un sistema multiprocessore, che gestisce automaticamente tutte le funzioni della turbina come l'avvio, l'arresto, la produzione, la disponibilità dei sottosistemi.
- Questo sistema consente anche il controllo a distanza dell'aerogeneratore. Il sistema di protezione è un sistema cablato completamente autonomo, capace di arrestare la turbina in qualunque situazione di emergenza, escludendo danni al sistema e mantenendo i carichi al di sotto dei limiti di progetto;
- gli aerogeneratori di grande taglia del tipo previsto in progetto, in considerazione anche del loro elevato valore commerciale, sono oggetto di programmi di manutenzione molto accurati che per quanto riguarda le pale è atto a verificare l'esistenza di piccole fratture, di cui se accertata la pericolosità determinano interventi di manutenzione ordinaria (riparazioni) o straordinaria (sostituzione del pezzo);

La statistica riporta fra le maggiori cause di danno quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare sarà protetto con parafulmini. In conformità a quanto previsto dalla norma CEI 81-1 la classe di protezione sarà quella più alta (Classe D). In termini probabilistici ciò significa un livello di protezione del 98% (il 2% di probabilità che a fulminazione avvenuta si abbiano danni al sistema).

Pertanto può affermarsi che la probabilità che si produca un danno al sistema con successivi incidenti è molto limitata se non addirittura nulla.

In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala.

Eventuali residui o frammenti di guscio dovuti ad un evento ceraunico hanno dimensioni e pesi così esigui da non permettere valutazioni circa eventuali traiettorie e gittate.

Queste sono comunque determinate quasi esclusivamente dal trasporto degli stessi ad opera del vento.


	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024</p> <p>Pag. 15 di 31</p>
---	---	--



Figura 5 - Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica

5. 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.

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024</p> <p>Pag. 16 di 31</p>
---	---	--

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. ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE E CALCOLO GITTATA IN 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.

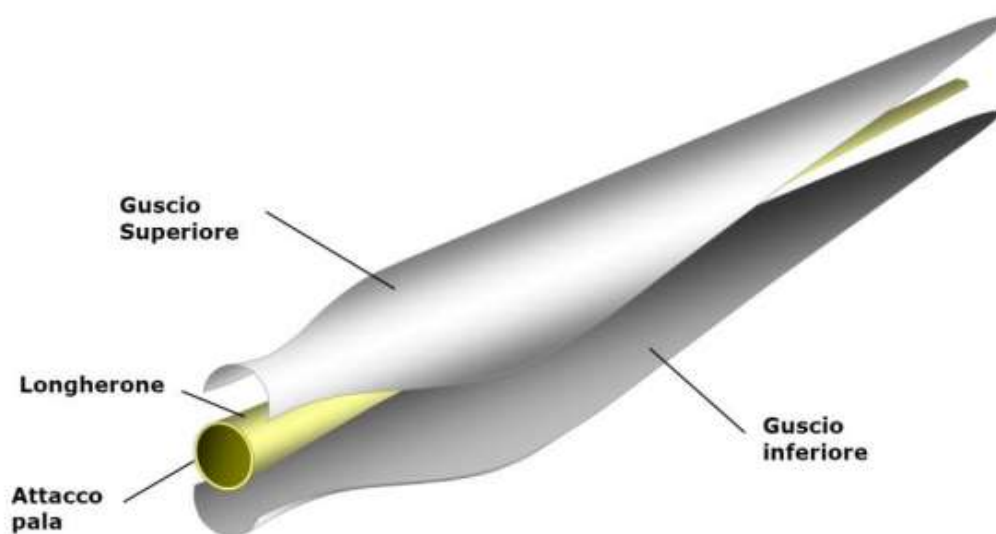


Figura 6 - Composizione di una pala

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.

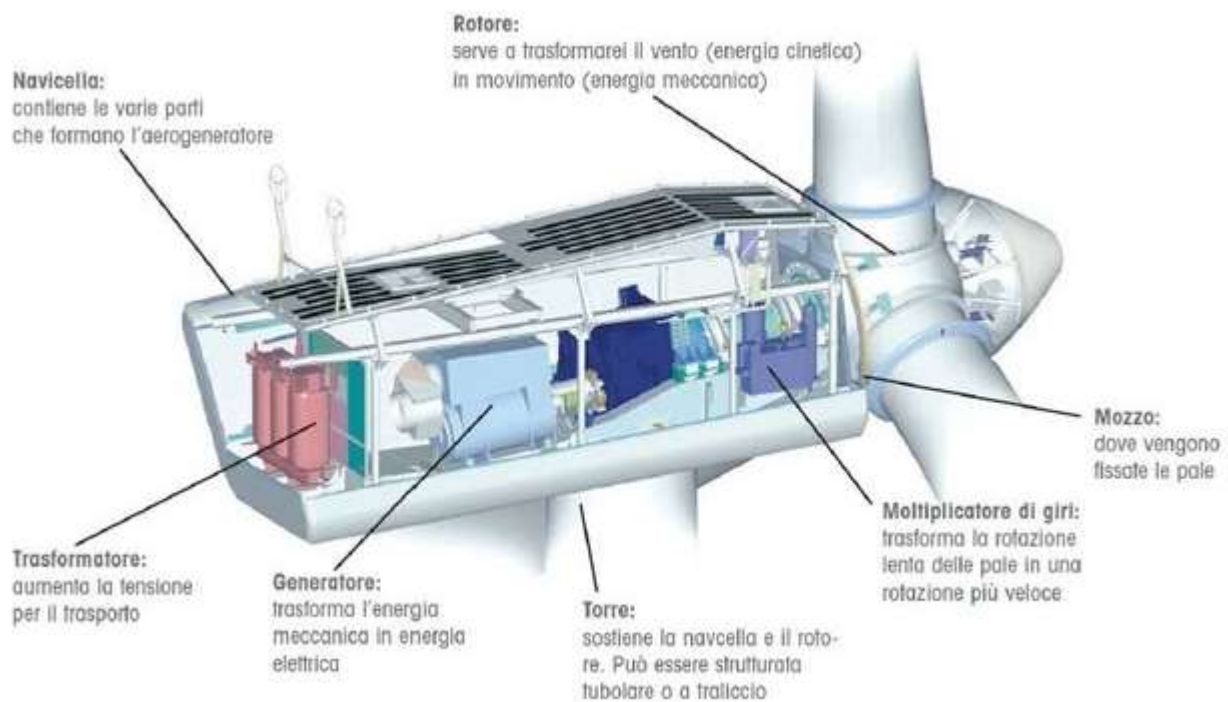


Figura 7 - Disposizione della navicella

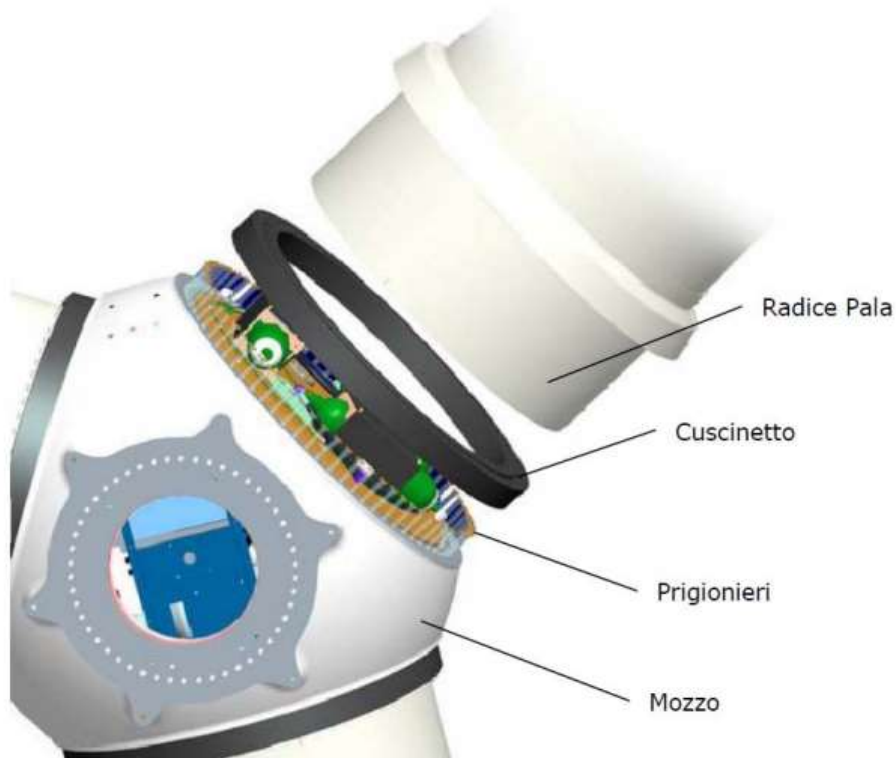



Figura 8 – Dettagli dell'attacco di una pala al mozzo

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024</p> <p>Pag. 19 di 31</p>
---	---	---

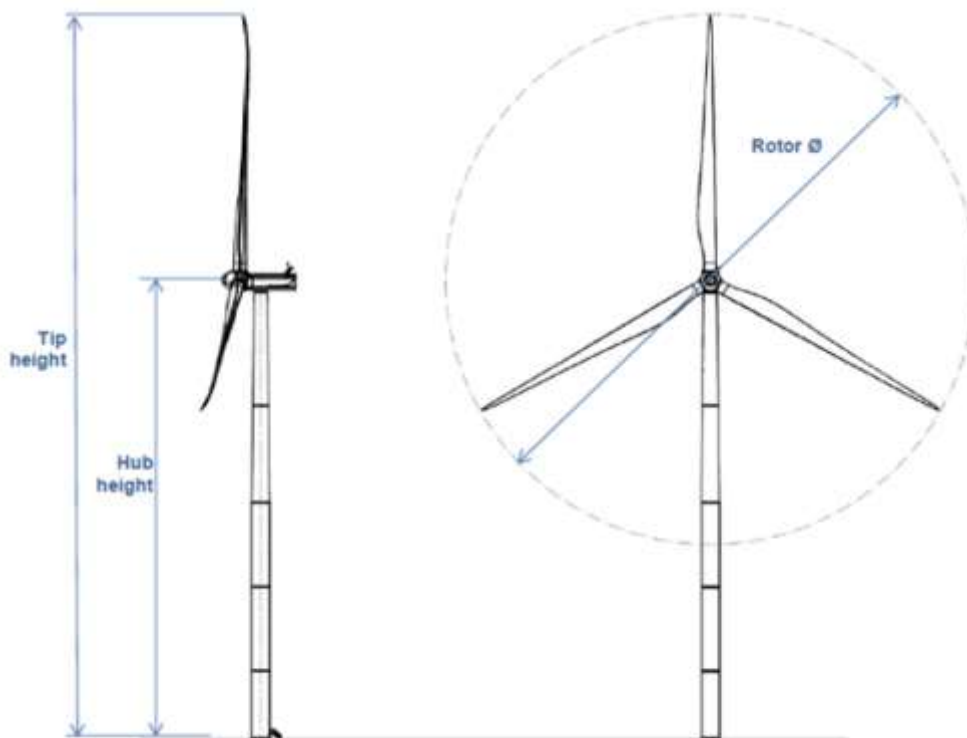


Figura 9 – Esempio Aerogeneratore

La tecnologia costruttiva degli aerogeneratori è alquanto sofisticata e di chiara derivazione aeronautica, per cui, la valutazione della gittata massima degli elementi di un aerogeneratore, in caso di rottura accidentale, comporta lo sviluppo di modelli di calcolo articolati e complessi.


I modelli teorici che meglio possono caratterizzare il moto nello spazio dei frammenti di pala o dell'intera pala possono essere ricondotti ai casi seguenti:

1. Primo caso: traiettoria a giavellotto con minore resistenza aerodinamica;

Calcolo della gittata massima del generico frammento di ala, in assenza di moto rotazionale intorno ad un asse qualsiasi, con traiettoria del frammento complanare al rotore.

2. Secondo caso: traiettoria a giavellotto con maggiore resistenza aerodinamica;

Calcolo della gittata massima del generico frammento di ala, sempre in assenza di moto rotazionale, intorno ad un asse qualsiasi, con traiettoria complanare al rotore e frammento ortogonale rispetto al piano del rotore.

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024 Pag. 20 di 31</p>
---	---	---

3. Terzo caso: calcolo della gittata massima in presenza di moti di rotazione intorno a ciascuno dei tre assi principali del frammento stesso. In caso di rottura, infatti, per il principio di conservazione del momento angolare, il generico spezzone di pala tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano; inoltre, a causa delle diverse pressioni cinetiche esercitate dal vento, lo spezzone di pala tende anche a ruotare intorno a ciascuno dei due assi principali appartenenti al proprio piano.

Le condizioni prese in considerazione nel 3° caso, permettono senza dubbio un calcolo più preciso e maggiormente corrispondente al reale moto di una pala staccatasi dal rotore per cause accidentali e forniscono, sperimentalmente, un valore di gittata di circa il 20% in meno di quella fornita dal caso 1. Come già accennato precedentemente, la risoluzione del 3° caso è però più complessa e richiede la conoscenza di alcune caratteristiche degli aerogeneratori, non sempre fornite dai produttori, poiché oggetto di brevetto. Pertanto si è deciso di utilizzare il 1° caso, di facile soluzione e che fornisce un risultato maggiorato di circa il 20%, garantendo così un ulteriore margine di sicurezza.

Quanto appena rappresentato è stato confermato anche dalla casa produttrice di aerogeneratori VESTAS attraverso il Technical Report - Rev.8 - 23/12/2011 dal nome "Calcolo della traiettoria di una pala eolica i condizioni nominali di funzionamento".


Nello studio citato la VESTAS ha infatti determinato la distanza che la pala di un aerogeneratore raggiunge, in caso di distacco dal mozzo, mentre la pala è in rotazione per otto modelli di aerogeneratori dimostrando che il primo caso (moto ideale irrotazionale) restituisce dei valori nettamente superiori al terzo caso (moto reale rotazionale complesso).

6.1 Geometria del problema e calcolo della gittata (1° caso)

Le equazioni del moto di un punto materiale soggetto solo alla forza di gravità sono:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= 0 \\ \ddot{y} &= -g\end{aligned}$$

Dove $g=9.82 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità. La legge del moto che costituisce soluzione di queste equazioni è:

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024</p> <p>Pag. 21 di 31</p>
---	---	--

$$x(t) = x_0 + v_x t$$

$$y(t) = y_0 + v_y t - \frac{1}{2} g t^2$$

Dove (x_0, v_0) è la posizione iniziale del punto materiale, e (v_x, v_y) è la sua velocità. La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo T tale che $y(T)=0$. Dalla legge del moto si ottiene:

$$T = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_y^2 + 2y_0 g}$$

In cui è stata scartata la soluzione corrispondente a tempi negativi.

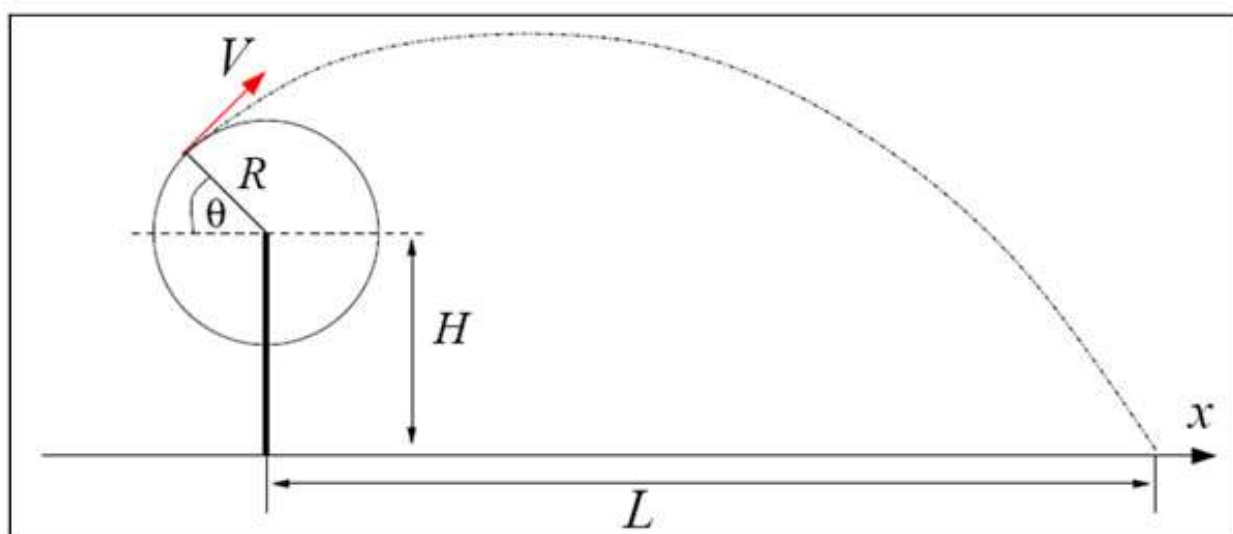


Figura 10 - Schema grafico di gittata

La posizione e la velocità iniziale sono determinate dall'angolo θ e dalla velocità iniziale V del frammento di pala al momento del distacco.


Esse sono legate alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$x_0 = -R \cos(\theta)$$

$$y_0 = H + R \sin(\theta)$$

$$v_x = V \sin(\theta)$$

$$v_y = V \cos(\theta)$$

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024 Pag. 22 di 31</p>
---	---	---

La gittata L è la distanza dal palo del punto di impatto al suolo del frammento di pala.

Dalla legge del moto si ottiene:

$$L = x(T)$$

Sostituendo l'espressione per T ricavato sopra, si ricava la gittata L in funzione di V e di θ :

$$L = \frac{V \sin(\theta)}{g} \left[V \cos(\theta) + \sqrt{V^2 \cos^2(\theta) + 2(H + R \sin(\theta))g} \right] - R \cos(\theta)$$

Si noti che, fissato un generico angolo θ , la gittata aumenta quadraticamente con V , salvo i casi particolari $\theta = \pm 90^\circ, 0^\circ, 180^\circ$, nei quali quest'ultima aumenta linearmente con V oppure è pari ad R .

La massima gittata si avrà per $\theta = 45^\circ$ e non quando il proiettile parte parallelamente al suolo.


6.2 Calcolo della gittata massima

Come già precedentemente indicato, il calcolo della gittata massima richiede la conoscenza dei valori H (altezza del mozzo), R (distanza dal mozzo del baricentro del frammento staccatosi dal rotore) e V (velocità di distacco del frammento di pala).

I valori di H e R sono rispettivamente $H = 138\text{m}$ e Lunghezza della pala = 86m e per il calcolo della velocità di distacco del frammento di pala si ricorre alla seguente formula:

$$V = \frac{2 \times \pi \times R \times rpm}{60}$$

Il massimo numero di giri per minuto che l'aerogeneratore compie è pari 8 giri/min quindi supponendo che la rottura della pala avvenga vicino al mozzo e considerando $R = 28,6\text{m}$ (lunghezza pala/3), si ottiene una velocità di distacco di circa 24 m/s nel baricentro della pala.

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024 Pag. 23 di 31</p>
---	---	---

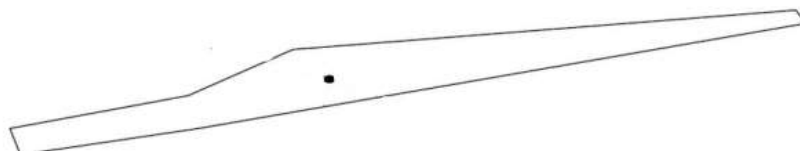


Figura 11 – Punto di Rottura della pala

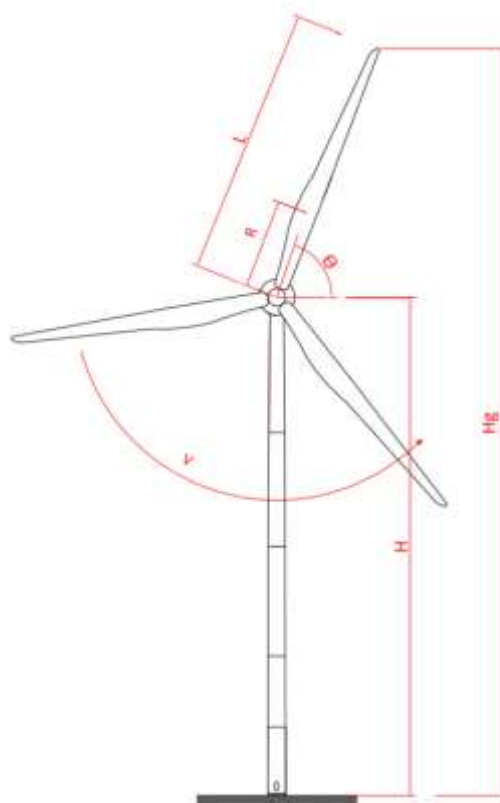


Figura 12 – Rappresentazione grafica rottura

Di seguito si riporta il grafico della gittata in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

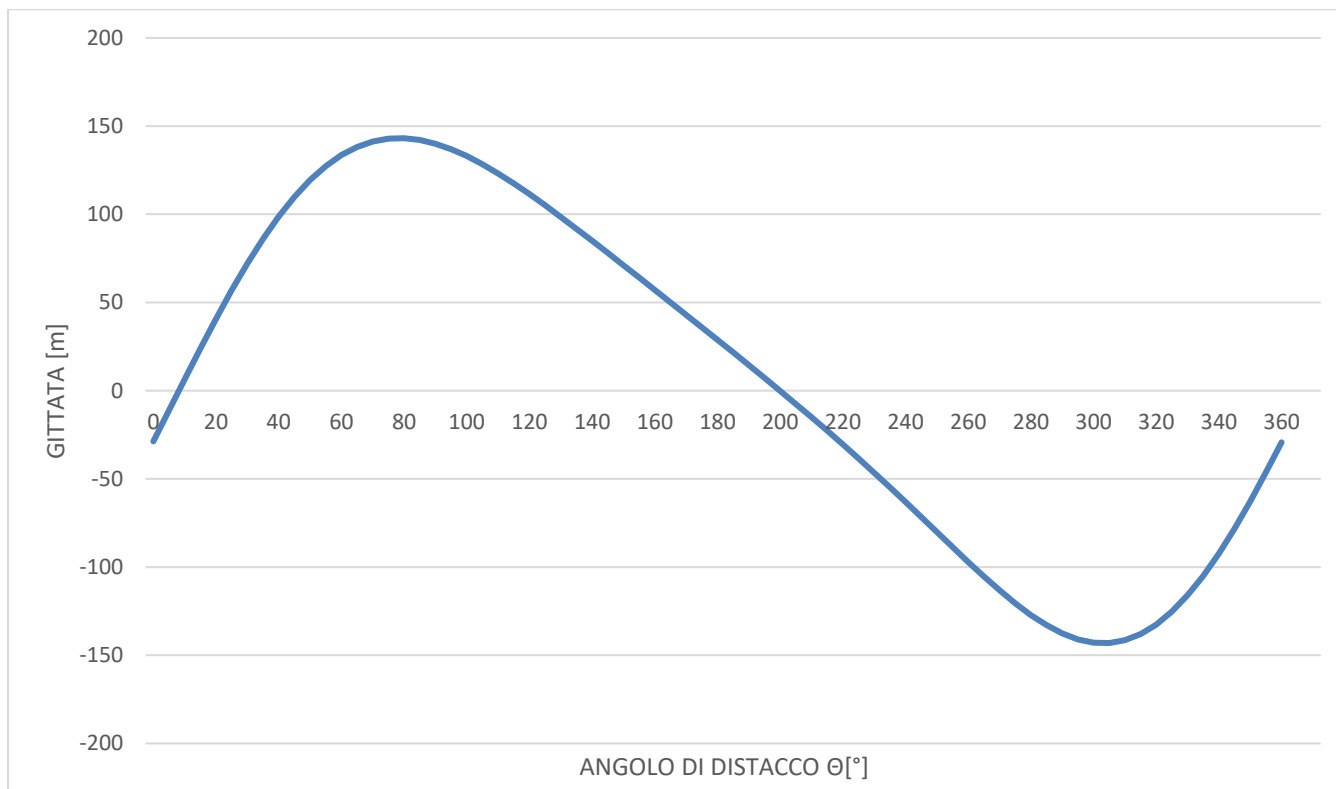


Tabella 3 - Gittata con velocità di distacco 24 m/s

Nel grafico si propone la gittata massima nel caso in cui si distacchi l'intera pala dal mozzo con una velocità di 24 m/s, che costituisce la massima velocità raggiunta dal baricentro della pala allorquando il rotore compie 8 rivoluzioni per minuto.

La gittata massima è di circa 143 m corrispondente ad un angolo di lancio $\theta = 80^\circ$.

Nella tabella che segue si sono indicati i valori più rappresentativi della gittata massima e della distanza totale dalla torre nel punto di caduta rispetto a valori di θ .

θ [rad]	θ [°]	Gittata
0	0	-28,66666667
0,087222	5	-11,15137427
0,174444	10	6,46345218
0,261667	15	23,88008038



PROGETTO DEFINITIVO

"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"

Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti

DATA:
MAGGIO 2024
Pag. 25 di 31

0,348889	20	40,81241587
0,436111	25	56,99389198
0,523333	30	72,18446337
0,610556	35	86,1764596
0,697778	40	98,7990985
0,785	45	109,9215123
0,872222	50	119,4542013
0,959444	55	127,348899
1,046667	60	133,5969071
1,133889	65	138,2260327
1,221111	70	141,2963358
1,308333	75	142,8949517
1,395556	80	143,1303062
1,482778	85	142,1260609
1,57	90	140,0151285
1,657222	95	136,9340653
1,744444	100	133,0180995
1,831667	105	128,3969752
1,918889	110	123,1917169
2,006111	115	117,5123318
2,093333	120	111,4564004
2,180556	125	105,1084507



PROGETTO DEFINITIVO

"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"

Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti

DATA:
MAGGIO 2024
Pag. 26 di 31

2,267778	130	98,53997625
2,355	135	91,8099456
2,442222	140	84,96565496
2,529444	145	78,04378888
2,616667	150	71,07157897
2,703889	155	64,06797508
2,791111	160	57,04476902
2,878333	165	50,0076332
2,965556	170	42,95705551
3,052778	175	35,88916683
3,14	180	28,79646951
3,227222	185	21,66848413
3,314444	190	14,49233994
3,401667	195	7,253341151
3,488889	200	-0,064451901
3,576111	205	-7,477580082
3,663333	210	-15,00242691
3,750556	215	-22,65428188
3,837778	220	-30,44615719
3,925	225	-38,38728718
4,012222	230	-46,48124642
4,099444	235	-54,72364262




PROGETTO DEFINITIVO

"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"

Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti

DATA:
MAGGIO 2024
Pag. 27 di 31

4,186667	240	-63,09938188
4,273889	245	-71,57957094
4,361111	250	-80,1182161
4,448333	255	-88,64899419
4,535556	260	-97,08248936
4,622778	265	-105,3043795
4,71	270	-113,175081
4,797222	275	-120,5312913
4,884444	280	-127,189691
4,971667	285	-132,9528143
5,058889	290	-137,6168082
5,146111	295	-140,9805483
5,233333	300	-142,8554201
5,320556	305	-143,0750184
5,407778	310	-141,5040717
5,495	315	-138,0460265
5,582222	320	-132,6488829
5,669444	325	-125,3090402
5,756667	330	-116,073053
5,843889	335	-105,0373227
5,931111	340	-92,34583399
6,018333	345	-78,18612023

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024 Pag. 28 di 31</p>
---	---	---

6,105556	350	-62,78369029
6,192778	355	-46,39518494
6,28	360	-29,30055927

Tabella 4 - Valori della gittata con evidenziata quella massima

7. CONCLUSIONI

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala o un frammento della stessa) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse.

Tuttavia, al fine della sicurezza, la stima della gittata massima di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico.

Il valore ricavato è sicuramente compatibile con quello degli studi forniti dalle ditte produttrici.


Si sottolinea che il valore precedentemente calcolato sovrastima quello reale della gittata massima; infatti la presenza dell'aria, genera delle forze di resistenza viscosse che agendo sulla superficie del frammento ne riducono tempo di volo e distanza.

A questa azione vanno aggiunte le forze aerodinamiche di portanza che possono innescarsi sul frammento di pala in virtù del profilo aerodinamico secondo il quale vengono modellate le sezioni trasversali della pala stessa; tale portanza potrebbe addirittura prolungare il volo e allungare la distanza percorsa.

Questa possibilità è correlata, tra l'altro, al rollio, all'imbardata ed all'impennarsi della pala durante il volo. L'azione della portanza può essere ricondotta e schematizzata nei calcoli con una riduzione percentuale della forza peso.

Considerando tutte le condizioni più gravose al momento dell'ipotetica rottura, come ad esempio il massimo numero di giri del rotore, l'inclinazione della pala corrispondente alla massima velocità e l'esclusione degli effetti dovuti alla resistenza dell'aria che la pala incontra durante la sua traiettoria si è ottenuta una lunghezza di circa 143 m.

Per poter avviare l'iter autorizzativo, i progetti devono rispettare i seguenti requisiti di sicurezza inderogabili:

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024 Pag. 29 di 31</p>
---	---	---

a) Distanza minima di ogni aerogeneratore dal limite dell'ambito urbano previsto dai regolamenti urbanistici redatti ai sensi della L.R. n. 23/99 determinata in base ad una verifica di compatibilità acustica e tale da garantire l'assenza di effetti di Shadow-Flickering in prossimità delle abitazioni, e comunque non inferiore a 1000 metri;

a-bis) Distanza minima di ogni aerogeneratore dalle abitazioni determinata in base ad una verifica di compatibilità acustica (relativi a tutte le frequenze emesse), di Shadow-Flickering, di sicurezza in caso di rottura accidentale degli organi rotanti. In ogni caso, tale distanza non deve essere inferiore a 2,5 volte l'altezza massima della pala (altezza della torre più lunghezza della pala) o 300 metri;

b) Distanza minima da edifici subordinata a studi di compatibilità acustica, di Shadow-Flickering, di sicurezza in caso di rottura accidentale degli organi rotanti. In ogni caso, tale distanza non deve essere inferiore a 300 metri;

c) Distanza minima da strade statali ed autostrade subordinata a studi di sicurezza in caso di rottura accidentale degli organi rotanti, in ogni caso tale distanza non deve essere inferiore a 300 metri;


d) Distanza minima da strade provinciali subordinata a studi di sicurezza in caso di rottura accidentale degli organi rotanti e comunque non inferiore a 200metri;

d-bis) Distanza minima da strade di accesso alle abitazioni subordinata a studi di sicurezza in caso di rottura accidentale degli organi rotanti e comunque non inferiore a 200 metri;

e) E' inoltre necessario nella progettazione, con riferimento al rischio sismico, osservare quanto previsto dall'Ordinanza n. 3274/03 e sue successive modifiche, nonché al DM 14 gennaio 2008 ed alla Circolare Esplicativa del Ministero delle Infrastrutture n.617 del 02/02/2009 e, con riferimento al rischio idrogeologico, osservare le prescrizioni previste dai Piani di Assetto Idrogeologico (PAI) delle competenti Autorità di Bacino;

f) Distanza tale da non interferire con le attività dei centri di osservazioni astronomiche e di rilevazioni di dati spaziali, da verificare con specifico studio da allegare al progetto.

Lo studio del layout di progetto, ossia la ubicazione degli aerogeneratori sul territorio, oltre che a seguire precise regole tecniche al fine di ottenere la massima producibilità, è stato redatto rispettando tutti i vincoli ambientali e territoriali presenti sul territorio.

	<p>PROGETTO DEFINITIVO</p> <p>"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p>Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p>DATA: MAGGIO 2024</p> <p>Pag. 30 di 31</p>
---	---	--

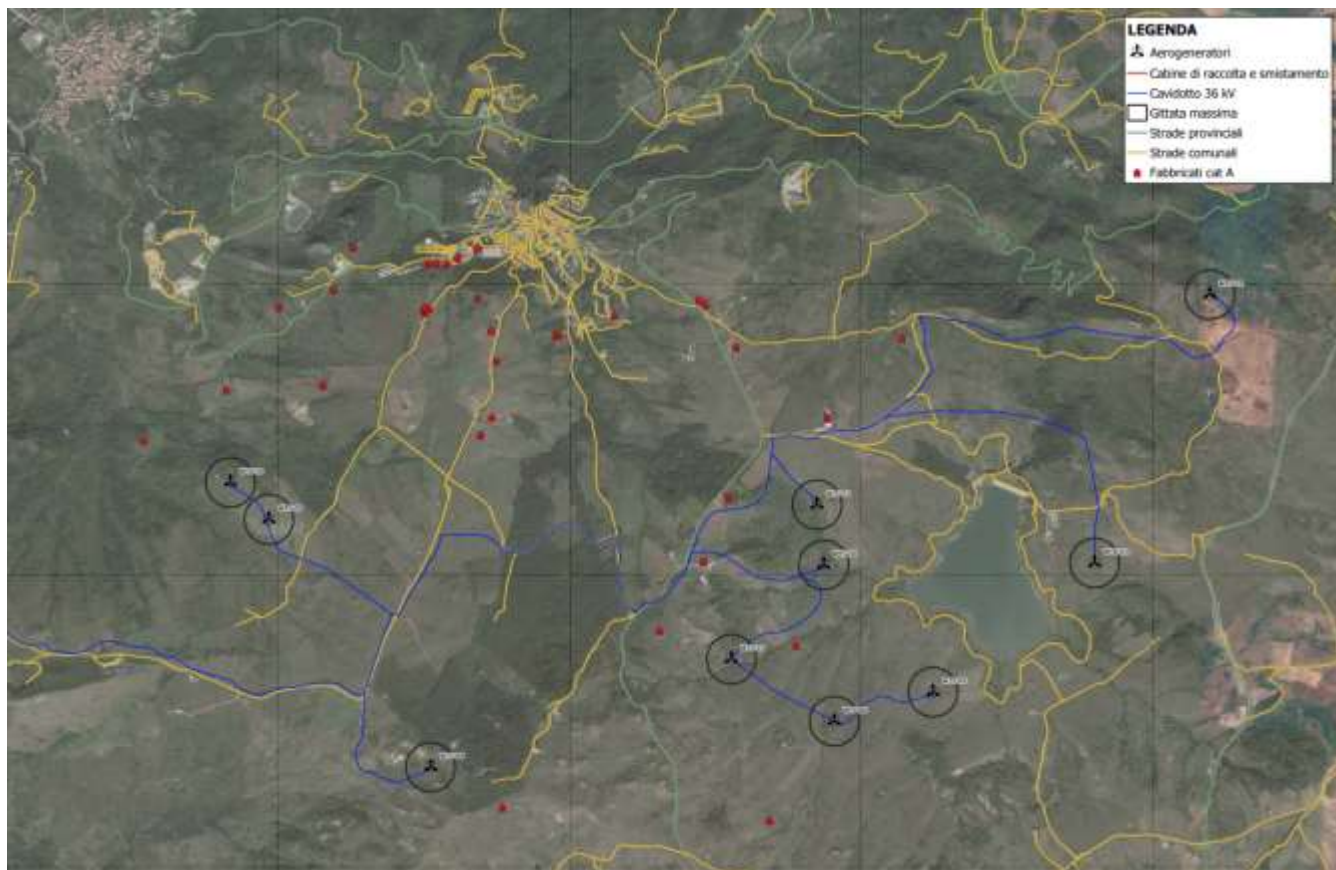



Figura 13 – Verifica gittata massima

Pertanto nessuna abitazione, edificio e strada provinciale/comunale è posizionata ad una distanza minore od uguale a 143 m dalle turbine di progetto, per cui risulta verificata la sicurezza nel caso di rottura degli elementi rotanti.

Con lo scopo di ridurre il rischio di distacco di frammenti è opportuna una pianificazione e messa in atto di opportune misure di prevenzione e monitoraggio, al fine di poter intervenire in tempo utile per scongiurare l'eventualità di una rottura.

Le azioni di monitoraggio e prevenzione svolte dalla società nei riguardi della tutela dei sistemi rotorici sono i seguenti:

	<p style="text-align: center;">PROGETTO DEFINITIVO</p> <p style="text-align: center;">"Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nel Comune di Pescopagano (PZ) denominato "Saetta" di potenza nominale pari a 72 MW"</p> <p style="text-align: center;">Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti</p>	<p style="text-align: center;">DATA: MAGGIO 2024 Pag. 31 di 31</p>
---	---	---

1. Ascolto e osservazione giornaliera e con campagne di indagini visive con lo scopo di evidenziare microalterazioni della superficie delle pale. Le campagne di indagini visive, svolte con telescopi ad alta definizione, servono a certificare periodicamente lo stato delle pale.
2. Monitoraggio strumentale continuo ed automatico di controllo dell'aerogeneratore.

Questo, tramite la valutazione di opportuni parametri, è in grado di individuare sbilanciamenti del rotore e, quando diventano significativi, attua il blocco dell'aerogeneratore.

Tali azioni di prevenzione sono dunque volte a mantenere le buone condizioni di uso dei rotori, mentre le azioni di monitoraggio impediscono di mantenere in esercizio operativo dei rotori che non rispondano alle caratteristiche definite dal costruttore.