

RICCIA – TUFARA
– GAMBATESA

REGIONE MOLISE

PROVINCIA DI
CAMPOBASSO

**IMPIANTO EOLICO DA 55 MW COMPOSTO DA N. 10
AEROGENERATORI RICADENTI NEI COMUNI DI RICCIA,
TUFARA E GAMBATESA IN PROVINCIA DI CAMPOBASSO,
CON RELATIVE OPERE ED INFRASTRUTTURE**

PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE GITTATA MASSIMA

Proponente:

EN.IT s.r.l.

Via Antonio Locatelli n.1

37122 Verona

P.IVA 04642500237

www.enitspa.it

enitsrl@pec.enitspa.it

Progettazione:

WH Group s.r.l.

Via A. Locatelli n.1 - 37122 Verona (VR)

P.IVA 12336131003

ingegneria@enitgroup.eu

Ing. Antonio Tartaglia



Spazio riservato agli Enti:

File: 2022030_6.5_RelazioneGttataMassima		Cod. 2022030		Scala: ---	
6.5	Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Approvato
	00	24/07/2023	Prima emissione	A. Tartaglia	S.M. Caputo
WH Group s.r.l. Via A. Locatelli n.1 - 37122 Verona (VR) – P.IVA 12336131003 ingegneria@enitgroup.eu					

INDICE

1	PREMESSA	4
2	DATI DI PROGETTO	5
3	PROGETTO DELL'OPERA	7
3.1	Localizzazione dell'impianto	7
3.2	Caratteristiche generali della centrale eolica	10
3.3	Soluzione di connessione	11
3.4	Tipologia di aerogeneratore	11
3.5	Cabine di consegna	13
3.6	Infrastrutture e opere civili	13
3.6.1	<i>Strade di accesso e viabilità di servizio</i>	13
3.6.2	<i>Cavidotti</i>	14
3.6.3	<i>Fondazioni aerogeneratore</i>	14
3.6.4	<i>Piazzole aerogeneratore</i>	15
3.7	Alimentazione ausiliari	17
4	ANALISI TEORICA DELLA GITTATA E CASI REALI	17
4.1	Moto rotazionale complesso	18
4.2	Rischio di rottura della pala	20
4.3	Esperienze e note statistiche	21
4.3.1	<i>Distacco di una delle pale dal rotore</i>	21
4.3.2	<i>Rottura (apertura) dell'estremità di pala</i>	22
5	CALCOLO GITTATA DELLA PALA	22
6	VERIFICA INTERFERENZE NELL'AREA SOTTESA DALLA GITTATA MASSIMA	32
7	CONCLUSIONI	35

Indice delle figure

Figura 1 – Inquadramento dell’impianto eolico su confini comunali	9
Figura 2 – Le opere in progetto sono localizzate al confine tra il bacino del fiume Volturno e quello del fiume Fortore....	10
Figura 3 – Esempio di installazione di turbina eolica.....	11
Figura 4 – Tipico dell’aerogeneratore in progetto, con dimensioni di ingombro	12
Figura 5 - Piazzola permanente tipo	16
Figura 6 - Rappresentazione degli assi di rotazione	18
Figura 7 - Componenti di un’ala	21
Figura 8 – Metodo di calcolo teorico della gittata massima	23
Figura 9 – Parametri geometrici assunti per il calcolo del moto parabolico.....	24
Figura 10 – Rappresentazione della legge di caduta di un grave, lanciato nello spazio con velocità iniziale v_0 e con una inclinazione rispetto all’orizzontale di θ	28
Figura 11 – Inquadramento delle WTG all’interno dei buffer costruiti a partire dai singoli aerogeneratori (Stralcio dell’elaborato 2022030_1.8.1.2_DGR_621-Let_C-2011)	34

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Inquadramento particellare delle opere in progetto	7
Tabella 2 – Localizzazione e principali caratteristiche degli aerogeneratori	8
Tabella 3 – Parametri geometrici assunti per il calcolo della gittata massima.....	23
Tabella 4 – Valori risultanti di gittata massima a diversi gradi di angolo θ	28
Tabella 5 – Valori teorici risultanti di gittata massima a diversi gradi di angolo θ (con riduzione della velocità periferica pari al 35% per tener conto della resistenza del mezzo).....	32

I PREMESSA

La presente relazione si riferisce al calcolo della gittata massima in caso di rottura di una pala dell'aerogeneratore e/o frammento di esso, relativo alla centrale di conversione dell'energia eolica in energia elettrica da realizzarsi nell'agro del Comune di Riccia, Tufara e Gambatesa, in Provincia di Campobasso, calcolo eseguito al fine di prevedere possibili problemi che una simile eventualità, per quanto improbabile, possa procurare danno a cose e/o persone.

Nei paragrafi seguenti è riportata la procedura di prima approssimazione seguita per il calcolo della gittata massima, considerando un angolo di lancio variabile, sia di una pala che di una parte terminale di essa relativamente ad un "Aerogeneratore di Progetto".

Il tipo di turbina utilizzato è la Vestas V150 con altezza del mozzo di 125 metri ed il diametro del rotore di 150 metri ed è contraddistinto dalle seguenti dimensioni e caratteristiche tecniche:

- ❖ Potenza nominale 5 e 6 MW
- ❖ Numero di pale 3
- ❖ Diametro rotore 150 m
- ❖ Altezza del mozzo 125 m
- ❖ Velocità del vento di cut-in 3 m/s
- ❖ Velocità del vento di cut-out 25 m/s
- ❖ Generatore Asincrono
- ❖ Tensione 690 V

Ci si è posti nell'ipotesi di distacco della stessa nel punto di attacco sul mozzo, punto di maggiore sollecitazione, per evidente effetto di intaglio dovuto al collegamento.

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo in esame, sono le più gravose possibili, in modo da trovarci nella situazione maggiormente cautelativa.

2 DATI DI PROGETTO

Proponente	EN.IT s.r.l.			
Sede legale	Via Antonio Locatelli n.1 37122 Verona (VR) enitsrl@pec.enitspa.it P.IVA 04642500237			
SITO				
Ubicazione delle WTG	Comune di Riccia (CB) Comune di Tufara (CB) Comune di Gambatesa (CB)			
Uso	Terreno agricolo			
Dati catastali delle WTG		Comune	Foglio	P.IIa
	<i>WTG 1</i>	Gambatesa	38	128
	<i>WTG 2</i>	Tufara	11	203
	<i>WTG 3</i>	Gambatesa	40	153
	<i>WTG 4</i>	Gambatesa	44	208
	<i>WTG 5</i>	Gambatesa	42	61
	<i>WTG 6</i>	Tufara	26	6
	<i>WTG 7</i>	Tufara	35	154
	<i>WTG 8</i>	Tufara	35	170
	<i>WTG 9</i>	Riccia	66	133
	<i>WTG 10</i>	Riccia	70	214

Proponente	EN.IT s.r.l.					
Localizzazione delle WTG	Geografiche WGS84		WGS84 UTM33T		Quota slm (m)	
	LAT	LONG	E	N		
	WTG 1	41,494661	14,924939	493734.686	4593674.210	718,604
	WTG 2	41,489.847	14,9221	493497.150	4593045.941	771,625
	WTG 3	41,484289	14,91735	493100.135	4592523.299	836,924
	WTG 4	41,477006	14,915214	492921.023	4591714.922	879,561
	WTG 5	41,486847	14,904992	492068.764	4592808.345	654,594
	WTG 6	41,468703	14,985523	498791.128	4590789.766	792,209
	WTG 7	41,450292	14,903161	491911.371	4588750.231	933,054
	WTG 8	41,449353	14,896953	491392.714	4588646.583	974,372
	WTG 9	41,432122	14,838669	486520.815	4586741.066	917,741
WTG 10	41,445242	14,882431	490179.103	4588191.734	774,043	
DATI TECNICI						
Potenza nominale dell'impianto	55 MW					
Tipo di intervento richiesto:	Nuovo impianto		SI			
	Trasformazione		SI			
	Ampliamento		NO			
Dati del collegamento elettrico	Descrizione della rete di collegamento		MT neutro isolato			
	Tensione nominale (Un)		Trasporto 30.000 V Consegna 36.000 V			
	Vincoli della Società Distributrice da rispettare		Normativa TERNA			
Misura dell'energia	Contatore proprio nel punto di consegna per misure GSE, UTF. Contatore proprio e UTF sulla MT per la misura della produzione					
Punto di Consegna	Nuove stazioni di trasformazione su linea "Campobasso CP – Castelpagano"					

3 PROGETTO DELL'OPERA

3.1 Localizzazione dell'impianto

Il presente progetto è finalizzato alla costruzione di una centrale eolica per la produzione di energia elettrica da ubicarsi nel Comune di Riccia, Tufara e Gambatesa, e con l'installazione delle opere ed infrastrutture connesse (cabina elettrica di consegna, rete elettrica interrata a 30 kV, strade di accesso alle WTG in fase di cantiere e di esercizio).

In particolare, 2 aereogeneratori sorgeranno nel comune di Riccia, 4 aerogeneratore nel comune di Tufara e 4 aerogeneratori nel comune di Gambatesa.

La centrale eolica catastalmente è così identificabile:

ID	Comune	Foglio	P.Ile
WTG 1	Gambatesa	38	128
WTG 2	Tufara	11	203
WTG 3	Gambatesa	40	153
WTG 4	Gambatesa	44	208
WTG 5	Gambatesa	42	61
WTG 6	Tufara	26	6
WTG 7	Tufara	35	154
WTG 8	Tufara	35	170
WTG 9	Riccia	66	133
WTG 10	Riccia	70	214

Tabella 1 – Inquadramento particellare delle opere in progetto

Per garantire l'accesso alle WTG saranno realizzate delle nuove strade brecciate ed alcuni adeguamenti alla viabilità esistente. Infine, durante la fase di cantiere saranno realizzate delle strade e delle piazzole temporanee.

Facendo riferimento agli elaborati grafici di inquadramento allegati, segue una tabella con indicazione delle coordinate (UTM/WGS84 - Fuso 33) e dimensioni verticali degli aerogeneratori che costituiscono l'impianto eolico:

	<i>Altezza mozzo (m)</i>	<i>Diametro rotore (m)</i>	<i>Potenza (MW)</i>	<i>Est</i>	<i>Nord</i>	<i>Quota slmm (m)</i>
WTG1	125	150	5.00	493734.686	4593674.210	718,604
WTG2	125	150	5.00	493497.150	4593045.941	771,625

WTG 3	125	150	5.00	493100.135	4592523.299	836,924
WTG4	125	150	5.00	492921.023	4591714.922	879,561
WTG5	125	150	5.00	492068.764	4592808.345	654,594
WTG6	125	150	6.00	498791.128	4590789.766	792,209
WTG7	125	150	6.00	491911.371	4588750.231	933,054
WTG8	125	150	6.00	491392.714	4588646.583	974,372
WTG9	125	150	6.00	486520.815	4586741.066	917,741
WTG10	125	150	6.00	490179.103	4588191.734	774,043

Tabella 2 – Localizzazione e principali caratteristiche degli aerogeneratori

A seguire un inquadramento del layout dell'impianto, in cui sono mostrate le posizioni degli aerogeneratori.

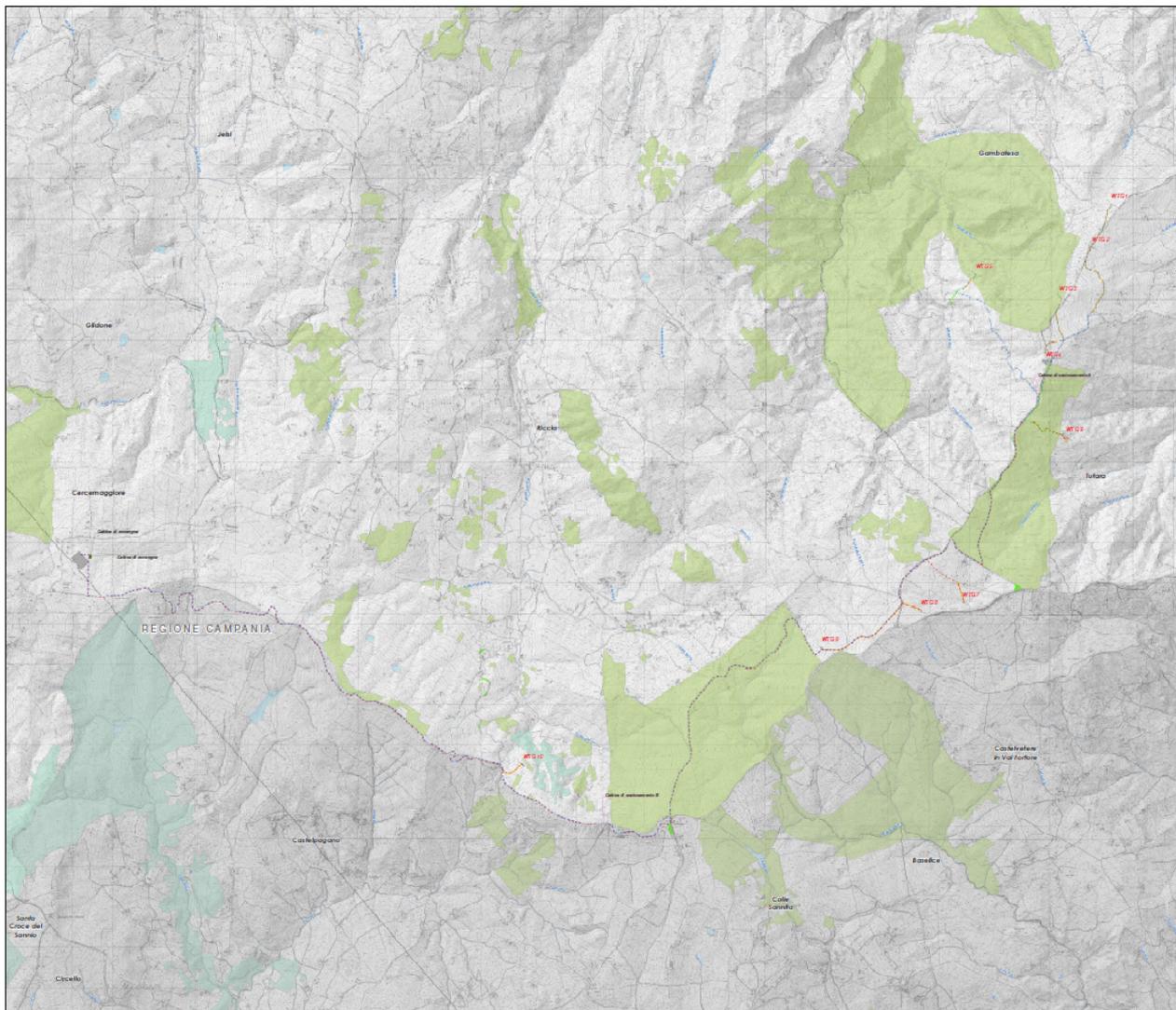


Figura 1 – Inquadramento dell’impianto eolico su confini comunali

Il Molise, come le altre regioni adriatiche, comprende una fascia montana interna che fa parte della dorsale appenninica, una parte centrale collinare e una pianeggiante in prossimità della costa. È solcato da due corsi d’acqua che la percorrono longitudinalmente: il Biferno e il Trigno.

Le opere in progetto sono localizzate al confine tra il bacino del fiume Volturno e quello del fiume Fortore, in un’area caratterizzata dalla presenza di torrenti minori, canali di scolo e linee di impluvio che disegnano un articolato reticolo idrografico.

La copertura del suolo prevalente sono territori agricoli, boschi e vegetazione rada o assente, con una quota media di 750 m s.l.m.

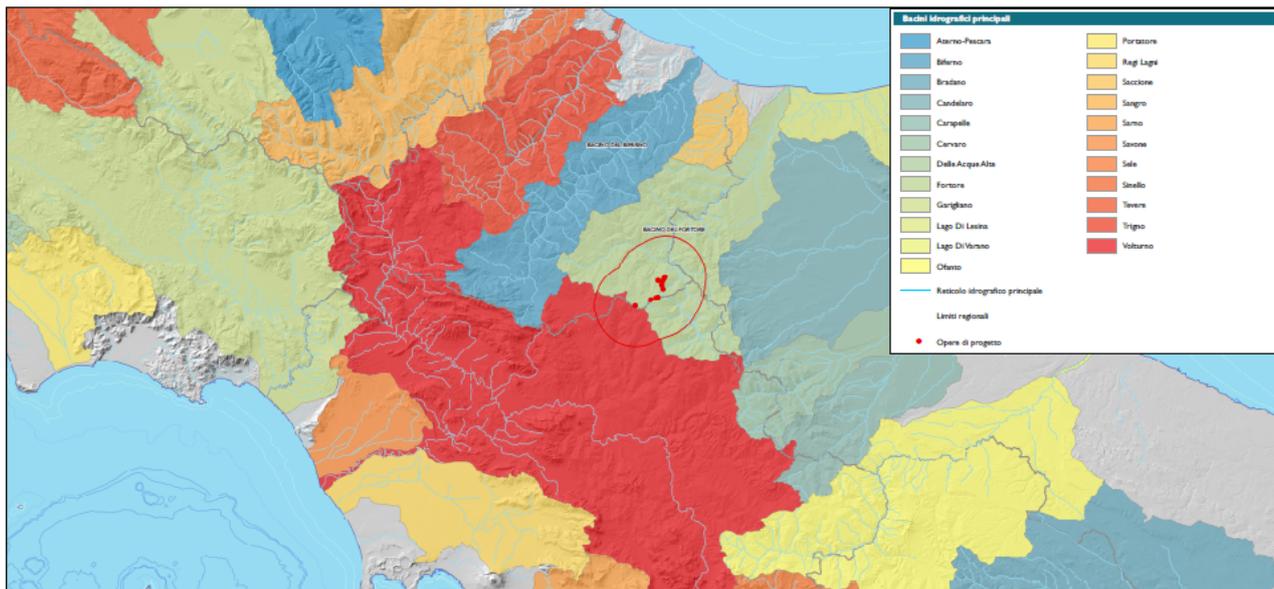


Figura 2 – Le opere in progetto sono localizzate al confine tra il bacino del fiume Volturno e quello del fiume Fortore

3.2 Caratteristiche generali della centrale eolica

La potenza installabile, considerando l'impianto composto da 5 macchine con potenza di 5 MW e da 5 macchine da 6 MW, risulta pari a 55 MW. Il sistema, quindi, sarà composto dai seguenti elementi principali:

- ❖ Vani tecnici di trasformazione interni alle torri,
- ❖ Quadri elettrici MT,
- ❖ Cabine di consegna.

Per la sua realizzazione sono quindi da prevedersi le seguenti opere ed infrastrutture:

Opere Civili:

- ❖ Realizzazione della viabilità di servizio interna all'impianto;
- ❖ Adeguamento/ampliamento della rete viaria esistente nel sito;
- ❖ Realizzazioni dei cavidotti di utenza e di connessione;
- ❖ Esecuzione dei plinti di fondazione delle macchine eoliche;
- ❖ Realizzazione delle piazzole degli aerogeneratori;
- ❖ Posa in opera delle cabine di consegna alla rete AT di Terna.



Figura 3 – Esempio di installazione di turbina eolica

Opere impiantistiche:

- ❖ Installazione degli aerogeneratori;
- ❖ Esecuzione dei collegamenti elettrici in cavidotti interrati tra i singoli aerogeneratori e tra gli aerogeneratori e la cabina di consegna dell'energia elettrica prodotta.

3.3 Soluzione di connessione

Lo schema di allacciamento alla RTN prevede la realizzazione di due cabine di Consegna collegata in antenna a 36 kV con due nuove stazioni elettriche di trasformazione a 36 kV di utenza, da inserire in entra-esce sulla linea RTN a 150 kV “Campobasso CP-Castelpagano”.

3.4 Tipologia di aerogeneratore

Gli aerogeneratori costituenti il parco eolico in oggetto hanno tutti lo stesso numero di pale (tre), la stessa altezza e il medesimo senso di rotazione. La scelta del modello di aerogeneratore da acquistarsi sarà effettuata dopo l’ottenimento della Autorizzazione Unica, per mezzo di procedura competitiva negoziata o di gara Europea.

Non è infatti possibile né sensato scegliere oggi il modello esatto di aerogeneratore, in considerazione dei seguenti fattori:

- ❖ la politica aziendale del Proponente impone di scegliere i fornitori sul mercato tramite selezioni competitive o gare;
- ❖ la innovazione tecnologica del settore è tale che nell’arco di 1-2 anni molti modelli usciranno dal mercato a vantaggio di nuovi modelli più efficienti;
- ❖ la innovazione di processo è tale che ogni anno si assiste ad una diminuzione di prezzo a parità di prestazione; scegliere perciò il modello oggi implicherebbe la rinuncia a godere del risparmio economico ottenibile fra qualche anno;

Alla luce di ciò, per redigere il Progetto, ed in cascata lo Studio di Impatto Ambientale, è stato perciò scelto un “Aerogeneratore di Progetto”. Il tipo di turbina utilizzato è la Vestas V150 con altezza del mozzo di 125 metri ed il diametro del rotore di 150 metri ed è contraddistinto dalle seguenti dimensioni e caratteristiche tecniche:

- ❖ Potenza nominale 5 e 6 MW
- ❖ Numero di pale 3
- ❖ Diametro rotore 150 m
- ❖ Altezza del mozzo 125 m
- ❖ Velocità del vento di cut-in 3 m/s
- ❖ Velocità del vento di cut-out 25 m/s
- ❖ Generatore Asincrono
- ❖ Tensione 690 V

Ciascuna torre sarà dotata di un proprio trasformatore 30 kV / 690 V, al fine di consentire il trasporto dell’energia verso la cabina utente ad un livello di tensione superiore, minimizzando così le perdite per effetto Joule.

Per l’architettura dell’aerogeneratore e le dimensioni caratteristiche si rimanda all’Elaborato Grafico 2022030_9.13_TipicoAerogeneratore.

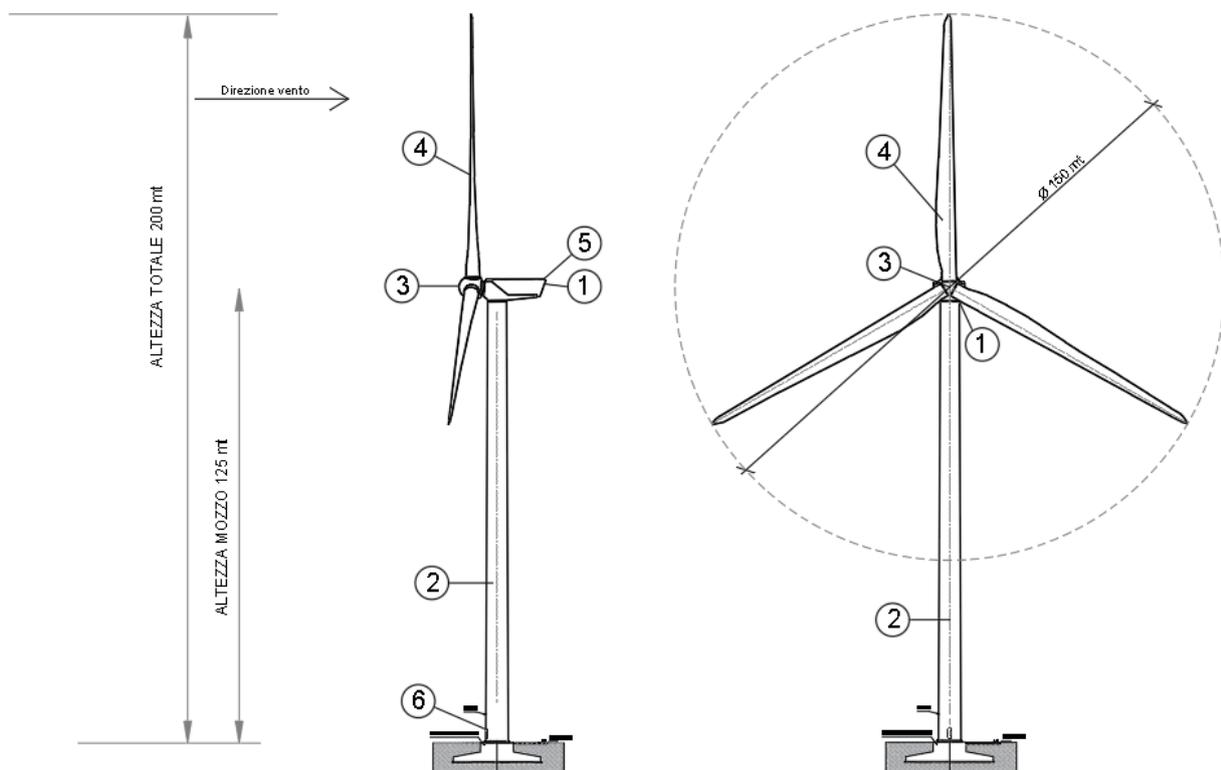


Figura 4 – Tipico dell’aerogeneratore in progetto, con dimensioni di ingombro

3.5 Cabine di consegna

A seguito di apposita richiesta di connessione, la Società En.It Italia srl ha ottenuto e successivamente accettato le due Soluzioni Tecniche Minime Generale (STMG):

- ❖ Codice Pratica n. **202002069** di potenza pari a **30 MW**;
- ❖ Codice Pratica n. **202002223** di potenza pari a **25 MW**.

L'impianto eolico sarà collegato in antenna a 150 kV con due nuove stazioni di elettriche di trasformazione a 36 kV della RTN, da inserire in entra-esce sulla linea RTN a 150 kV "Campobasso CP - Castelpagano", previa trasformazione della tensione, in idonee Sotto Stazioni Elettriche Utente (SSEU) di proprietà del Proponente, dalla M.T. a 30 kV (tensione di esercizio dell'impianto di produzione) alla A.T. a 36 kV (tensione di consegna lato TERNA S.p.A.).

Le Sotto Stazioni Elettriche Utente (SSEU) di trasformazione MT/AT prevista in progetto hanno la duplice funzione di:

- ❖ raccogliere l'energia prodotta dagli aerogeneratori del parco eolico mediante la rete di cavidotti;
- ❖ convertire la stessa energia da MT ad AT.

Il tutto finalizzato alla consegna in AT dell'energia prodotta dal parco eolico alla stazione elettrica del gestore TERNA S.p.A.

Come detto, il sistema realizzato per il trasferimento dell'energia prodotta dagli aerogeneratori per la connessione alla Rete Nazionale prevede:

- ❖ l'ubicazione di due nuove Sotto Stazioni Elettriche Utente MT/AT,
- ❖ la realizzazione di due linee AT tra le stesse nuove Sotto Stazioni Elettriche Utente MT/AT e la indicata Stazione Elettrica di trasformazione TERNA.

Nella SSEU MT/AT vengono individuate le seguenti aree:

- ❖ Area Locali strumentazione elettrica collocata all'interno dei Locali Tecnici;
- ❖ Area Trasformatore/i;
- ❖ Area componenti elettromeccaniche;
- ❖ Area Libera brecciata e area Libera asfaltata.

Per migliori particolari e gli ingombri si rimanda alla lettura della allegata documentazione progettuale.

3.6 Infrastrutture e opere civili

3.6.1 Strade di accesso e viabilità di servizio

Per quanto possibile sarà utilizzata la viabilità già esistente, al fine di minimizzare gli effetti derivanti dalla realizzazione sia delle opere di accesso così come di quelle per l'allacciamento alla rete di trasmissione nazionale. La creazione di nuove strade è limitata alle zone dove non è presente alcun tipo di viabilità fruibile e/o adeguabile, portando allo sviluppo della nuova viabilità di accesso tra le strade esistenti e/o adeguate e le piazzole di servizio degli aerogeneratori. Nel caso di adeguamento di strade esistenti e/o di creazione

di strade nuove, la larghezza normale della strada in rettilineo fra i cigli estremi (cunette escluse) sarà fissata in almeno 5 m.

La viabilità di servizio, come detto, cerca di ripercorrere il più possibile la viabilità esistente e i collegamenti tra le singole parti dell'impianto saranno fatti in modo da non determinare un consumo di suolo, ripercorrendo i confini catastali.

Il sito è raggiungibile mediante strade come rappresentato nell'Elaborato 2022030_1.12_PlanimetriaAccessiStradali.

L'attuale ipotesi di ubicazione degli aerogeneratori tiene quindi in debito conto sia delle strade principali di accesso, che delle strade secondarie.

Ove necessario saranno previsti adeguamenti del fondo stradale e/o allargamenti temporanei della sede stradale della viabilità esistente, per tutto il tratto che conduce all'impianto.

In corrispondenza dell'accesso dalla SS e in tutti i tratti di accesso alle turbine, sono stati previsti dei raccordi con lo scopo di rendere il raggio di curvatura idoneo all'accesso dei mezzi eccezionali.

I tratti di nuova viabilità di progetto sono limitati a circa 5,5 km.

3.6.2 Cavidotti

L'intervento è previsto nel territorio di Riccia, Tufara, Gambatesa e Castelpagano e il punto di allaccio alla rete TERNA è nel comune di Cercemaggiore (CB). Nell'individuazione del tracciato del cavidotto di connessione alla soluzione individuata dalla STMG, si è cercato di impiegare il medesimo tracciato della viabilità interna per quanto concerne la connessione tra le turbine. Per il tratto di cavidotto di collegamento tra l'impianto e la cabina di consegna è stato ipotizzato di seguire la viabilità pubblica, evitare centri abitati e minimizzare l'occupazione di nuovi terreni non interessati da altre opere riguardanti l'impianto.

La distanza tra le cabine di consegna e l'aerogeneratore più vicino sarà pari a circa 5,8 km in linea d'aria, comporterà la realizzazione di un cavidotto MT di utenza di connessione tra le WTG e il punto di connessione. In particolare, il cavidotto interrato di MT (30 kV) di collegamento degli aerogeneratori avrà una lunghezza pari a 25.619 m per la STMG cod.202002223 e una lunghezza di 21.098 m per la STMG cod.202002069, ricadente nel comune di Cercemaggiore, Riccia, Tufara e Gambatesa, in provincia di Campobasso e nel comune di Castelpagano, in provincia di Benevento.

Per ottimizzare le opere di scavo e l'occupazione, è stato infatti ipotizzato di impiegare un unico scavo condiviso da più linee fino al punto di connessione; pertanto, i cavidotti saranno caratterizzati da un diverso numero di terne a seconda del tratto considerato.

Sono stati inoltre previsti degli attraversamenti sia di tipo "TOC" che di tipo "a staffaggio" in corrispondenza di corsi d'acqua. L'attraversamento di tipo TOC è una tecnica di trivellazione con controllo attivo della traiettoria, per la posa di infrastrutture sotterranee senza scavo.

3.6.3 Fondazioni aerogeneratore

Dal punto di vista strutturale assume grande rilevanza la struttura di fondazione: esiste una diversa situazione di carichi statici e dinamici sulla fondazione e sull'aerogeneratore, sia per la presenza di una maggiore risorsa eolica in quota, che per una maggiore frequenza di fulminazione. Fondamentale è la scelta del grado di rigidità trasferibile alla fondazione nei

confronti di quello dell'aerogeneratore: una rigidità troppo elevata, può indurre vincoli al comportamento dell'aerogeneratore, mentre un assetto troppo elastico potrebbe abbassare la frequenza naturale del complesso a valori non corretti per la stabilità.

Alcuni aspetti indispensabili da esaminare nel dimensionamento di una struttura di fondazione:

- ❖ caratteristiche del terreno di fondazione: composizione stratigrafica, capacità portante degli strati interessati dalla fondazione, tipologia di terreno, andamento orografico;
- ❖ velocità/direzioni del vento ed altezza delle rilevazioni effettuate, valori del vento estremo;
- ❖ effetti prodotti dalla macchina eolica: momento flettente, taglio e forza verticale;
- ❖ criteri di calcolo: riguardano le condizioni di carico e relativi coefficienti di sicurezza:
 - forze ambientali + peso proprio;
 - forze di esercizio + peso proprio;
 - la più gravosa fra le condizioni suddette + forze ambientali;
- ❖ materiale strutturale;
- ❖ protezione superficiale della struttura: gli effetti da contrastare possono essere lo scouring (rimozione del terreno o di altro materiale di accumulo dalle aree di contatto con la fondazione), e la corrosione soprattutto delle parti metalliche;
- ❖ fenomeni di fatica.

Dalle indagini geologiche e geotecniche condotte in situ, che hanno consentito di ottenere la caratterizzazione geotecnica del terreno, in considerazione della classe sismica dei comuni in oggetto ed in riferimento alle forze agenti sulla struttura torre - aerogeneratore, è previsto l'impiego di fondazioni in CLS armato il cui calcolo e reale dimensionamento sarà subordinato ai parametri di sismicità ed alle caratteristiche geotecniche del terreno rilevate da indagini puntali che saranno eseguite in fase di progettazione esecutiva.

Il plinto di fondazione, su cui poggerà la base della torre di sostegno, sarà realizzato in c.a. con la definizione di una armatura in ferro. La parte centrale sarà costituita da un concio che sarà annegato nel calcestruzzo e a cui sarà ancorata la sezione inferiore della torre tubolare tramite tirafondi. Essi risulteranno completamente interrati alla profondità tale da consentire il riposizionamento di un adeguato strato di materiale terroso in modo da assicurare la ricostruzione e l'impiego del suolo.

È previsto l'impiego di fondazioni in CLS armato a platea circolare, il cui calcolo sarà subordinato ai parametri di sismicità ed alle caratteristiche geotecniche del terreno rilevate da indagini puntali, da effettuarsi in fase di progetto esecutivo.

3.6.4 Piazzole aerogeneratore

In fase di cantiere e di realizzazione dell'impianto sarà necessario approntare delle piazzole di montaggio degli aerogeneratori, prossime a ciascuna fondazione, dedicate al posizionamento delle gru ed al montaggio di ognuno dei n.10 aerogeneratori costituenti il parco eolico.

Per impostare correttamente la progettazione delle piazzole si è analizzato nel dettaglio i pesi e le dimensioni di ogni componente dei potenziali modelli di aerogeneratore da utilizzare, le tipologie e dimensioni di gru necessarie e conseguenti dimensioni minime necessarie per le piazzole.

Nello specifico le piazzole di cantiere sono state dimensionate per consentire l'utilizzo di una gru tralicciata, la quale oltre la piazzola di montaggio, necessita di una pista di 120 metri circa, rettilinea e planare e contigua alla piazzola, sulla quale distendere il braccio tralicciato per effettuarne il montaggio, e di un'ulteriore piazzola sulla quale posizionare 2 autogrù secondarie necessarie al montaggio e sollevamento del braccio.

Le piazzole di montaggio così definite, da installarsi in aree non pianeggianti, verranno realizzate con piani di posa adattati alle pendenze del terreno di ciascuna piazzola con l'obiettivo di minimizzare i movimenti terra (sterri e rilevati) necessari per la realizzazione delle stesse.

Sono state ipotizzate due tipologie di piazzola di montaggio, con stoccaggio parziale e assemblaggio in due fasi e con stoccaggio totale e assemblaggio in una fase. La scelta tra le due tipologie di montaggio sarà effettuata in fase di progettazione esecutiva e gli elaborati del presente progetto, nonché il piano particellare di esproprio sono stati redatti in via prudenziale nell'ipotesi di ingombro massimo (stoccaggio totale e assemblaggio in una fase).

Le dimensioni della piazzola di montaggio sono state fissate in relazione alle specifiche tecniche della turbina. Tali dimensioni sono suddivise in zone dedicate allo stoccaggio pale, zone a 2 kg/cm^2 e zone a 3 kg/cm^2 , caratterizzazione derivante dalla differente capacità portante del terreno e dal differente impiego dello stesso tra movimentazioni dei materiali e stoccaggio e zona di installazione della gru principale.

Al termine dei lavori, saranno rimosse le piazzole di montaggio e mantenute solo quelle di tipo definitivo, finalizzate a garantire la gestione e manutenzione dell'impianto durante la vita utile.

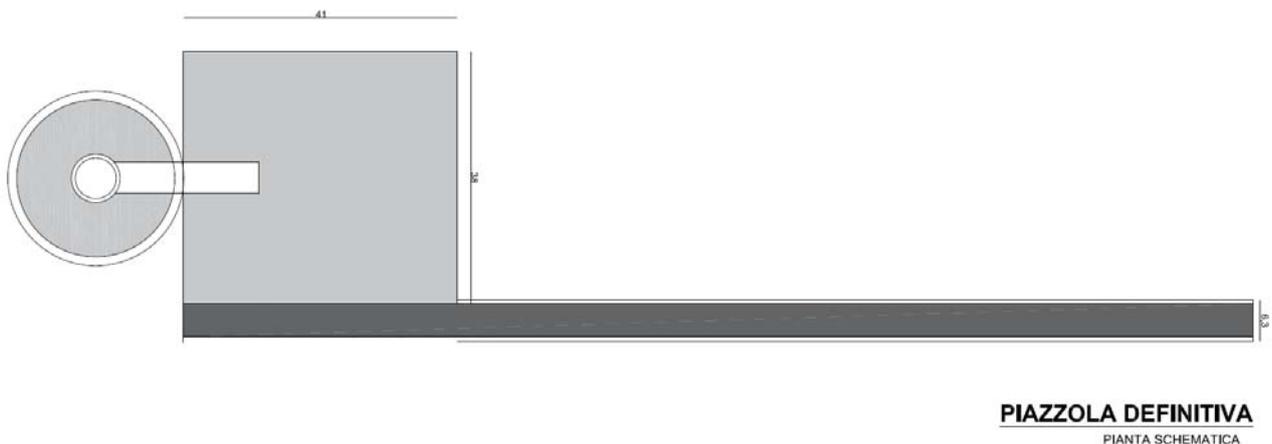


Figura 5 - Piazzola permanente tipo

3.7 Alimentazione ausiliari

L'alimentazione dei servizi ausiliari sarà derivata direttamente dal trasformatore MT/BT a cui sarà installato un trafo 690/400 e farà capo al quadro generale ausiliari (QAUX) che alimenterà:

- ❖ gli impianti ausiliari del locale tecnico;
- ❖ l'impianto di videocontrollo ed il relativo impianto di illuminazione.

4 ANALISI TEORICA DELLA GITTATA E CASI REALI

Da un punto di vista teorico, non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore della pala o della sezione di pala distaccata, si avrebbe nel caso di distacco in corrispondenza della posizione palare pari a 45 gradi e di moto a "giavellotto" del frammento.

Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di un moto a giavellotto è praticamente impossibile: le forze di resistenza viscosa, le azioni resistive del vento ed il moto di rotazione complesso dovuto al profilo aerodinamico della pala/frammento-di-pala, si oppongono al moto e riducono il tempo e la distanza di volo.

Traiettoria del frammento

La traiettoria iniziale della pala/sezione-di-pala distaccata è determinata principalmente dall'angolo in corrispondenza del quale avviene il distacco e dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia.

Per quanto riguarda le forze di tipo aerodinamico e relativi momenti, queste agiranno sulla pala/sezione-di-pala influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

Tempo di volo

Il tempo di volo generalmente è determinato:

- ❖ dalla componente verticale della velocità iniziale posseduta dalla pala/sezione di pala immediatamente dopo il distacco, in corrispondenza del suo punto baricentrico;
- ❖ dalla posizione rispetto al suolo;
- ❖ dall'accelerazione verticale;
- ❖ dalle forze di attrito agenti sulla pala/sezione di pala stessa.

Il tempo di volo che si deduce da tali considerazioni è utilizzato successivamente per il calcolo della distanza.

Distanza percorsa

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

- ❖ dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco;
- ❖ dalla velocità del vento nel momento del distacco;
- ❖ dalle forze di attrito che agiscono sulla pala/sezione-di-pala in volo;
- ❖ dal tempo di volo.

4.1 Moto rotazionale complesso

Il moto reale della parte distaccata risulta molto complesso, poiché dipendente, come detto, dalle caratteristiche aerodinamiche di questa e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala). I casi puramente teorici di rottura e di volo con moto “a giavellotto” sono da escludersi data la complessità aerodinamica della pala e la presenza dell’azione del vento.

Il modello teorico che meglio caratterizza il moto delle parti (siano esse sezioni di pala e la pala intera) che hanno subito il distacco, e che più si avvicina al caso reale, è il modello “Complex Rotational Motion”, che permette di studiare il moto nel suo complesso, considerando i moti di rotazione intorno agli assi xx , yy , zz .

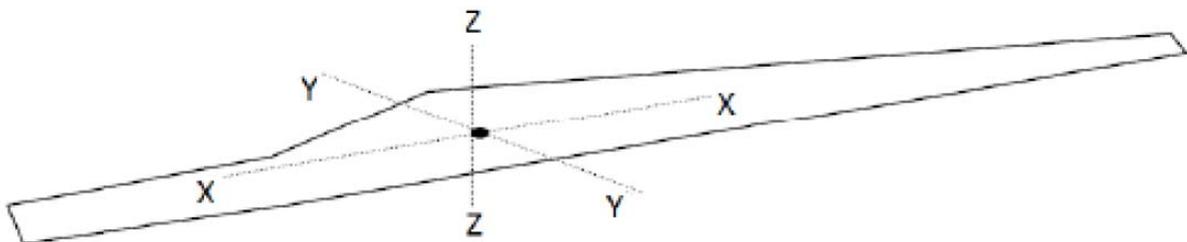


Figura 6 - Rappresentazione degli assi di rotazione

La rotazione della pala intorno all'asse zz è causata dalla conservazione del momento della quantità di moto: in caso di rottura, per il principio di conservazione, il generico spezzone tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano.

La rotazione intorno agli altri assi è dovuta alle azioni indotte dal vento incidente *out of plane* sulla pala/sezione di pala. In particolare, si genera:

- ❖ un momento intorno all'asse yy : centro di massa e centro aerodinamico della pala/sezione di pala non coincidono;
- ❖ un momento intorno all'asse xx : centro di massa della sezione di pala lungo la corda e il centro aerodinamico non coincidono.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di distacco/lancio e dalle forze inerziali agenti sulla pala/ frammento di pala: al momento del distacco, oltre all'impulso, agiscono anche i momenti di *flapwise*, *edgewise* e *pitchwise*.

Pertanto, il moto della parte distaccata sarà un moto rotazionale, su cui agisce anche la forza di gravità. La resistenza offerta dalla pala al moto sia *in plane* che *out plane* è generata dalla rotazione intorno agli assi xx e yy .

La massima gittata della pala/frammento di pala è strettamente dipendente:

- ❖ dal numero di giri del rotore e quindi dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;
- ❖ dalla posizione della pala nel momento del distacco;
- ❖ dalla dimensione del frammento;

- ❖ dal peso del frammento (più leggero è, più il suo moto è limitato dalle forze di attrito viscoso);
- ❖ dal profilo aerodinamico della pala/frammento di pala.

Di questi parametri si tiene sostanzialmente conto nello studio eseguito dalla PB Power Ltd per conto della società Vestas Wind System “*VESTAS V80 – Blade throw calculation under normal operating conditions*” (2001).

Tale studio ha preso in considerazione due aerogeneratori, aventi caratteristiche diverse:

- ❖ aerogeneratore TIPO 1 ha una pala di lunghezza pari a 39 m e una velocità di rotazione massima a regime di 19,2 rpm posto su una torre di altezza pari a 67 m
- ❖ aerogeneratore TIPO 2 ha una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 rpm posto su una torre di altezza pari a 80 m.

Per la prima tipologia di aerogeneratore è stato fatto uno studio completo ipotizzando tre condizioni:

- ❖ la prima più conservativa include solo le forze di inerzia ed esclude le forze viscosse;
- ❖ la seconda include le forze viscosse;
- ❖ la terza considera il moto della pala completo (moto rotazionale complesso).

La velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della pala:

- ❖ per l'aerogeneratore di TIPO 1 pari a 20 giri/min
- ❖ per l'aerogeneratore di TIPO 2 pari a 16,39 giri/min

In sintesi, i risultati ottenuti sono i seguenti:

- ❖ aerogeneratore di TIPO 1 moto rotazionale complesso (condizione 3) la gittata pari a circa 110 m,
- ❖ aerogeneratore di TIPO 1 moto considerando gli effetti delle forze viscosse (condizione 2) la gittata pari a circa 113 m
- ❖ aerogeneratore di TIPO 1, caso semplificato che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosse 131,6 m

Per l'aerogeneratore di TIPO 2 è stato effettuato solo il calcolo nella condizione 1, escludendo le forze viscosse e non considerando la complessità del moto, ottenendo un valore di 108 m.

Possiamo pertanto concludere che:

- ❖ se effettuiamo un calcolo che tenga conto dei valori cinematici e geometrici del moto senza considerare gli effetti viscosi e soprattutto la complessità del moto rotazionale otteniamo valori di gittata più alti di quelli reali (valore teorico > valore reale)
- ❖ più che dalle dimensioni dell'aerogeneratore e dell'altezza della torre, i valori della gittata dipendono dalla velocità di rotazione. Infatti, l'aerogeneratore di TIPO 2 (h torre 80 m, pala 44 m), pur essendo più alto e con rotore più grande rispetto a quello di TIPO 1 (h torre 67 m, pala 39 m) ha una gittata massima teorica minore di quella dell'aerogeneratore di TIPO 1 (108 m < 131,6 m).

Nel paragrafo successivo effettueremo il calcolo della gittata per l'aerogeneratore in progetto, considerando solo parametri geometrici e cinematici e non l'effettivo moto rotazionale complesso, e pertanto otterremo valori della gittata sicuramente superiori rispetto a quelli reali.

4.2 Rischio di rottura della pala

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.

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 rischio dovuto alla rottura accidentale di pezzi meccanici in rotazione va valutato considerando 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);
- ❖ 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 I). 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.

4.3 Esperienze e note statistiche

È necessario enfatizzare che dal punto di vista progettuale la combinazione di coefficienti di sicurezza per i carichi, i materiali utilizzati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura rispettano quanto prescritto dalla norma IEC61400-1. In accordo a tale norma le pale degli aerogeneratori sono considerate "fail safe".

L'esperienza pratica ha mostrato che in caso di distacco di pala o parti di essa il moto è stato di tipo "rotazionale complesso" e le distanze raggiunte sono normalmente risultate inferiori a quelle stimate con i calcoli semplificati qui riportati.

Frammenti di pala, solitamente di piccole dimensioni, per la maggior parte staccatisi a causa di azioni esterne (tipica la fulminazione atmosferica) o imperizia umana, sono stati ritrovati a non più di 40-50 m dalla base dell'aerogeneratore.

Tralasciando gli incidenti dovuti a cause eccezionali (uragani, tifoni), nei successivi paragrafi vengono descritti alcuni eventi e la valutazione tecnica alla base dell'analisi dei rischi sviluppata per eliminare la possibilità di reiterazione dell'incidente.

4.3.1 Distacco di una delle pale dal rotore

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 il mozzo. In occasione di tali tipi di evento, la pala ha raggiunto il terreno ad una distanza inferiore ai cento metri.

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.

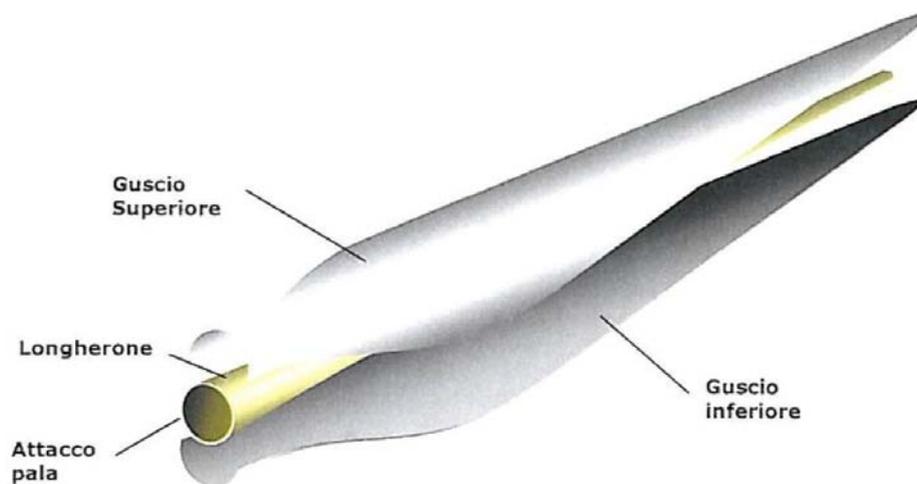


Figura 7 - Componenti di un'ala

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 e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

L'evento si è manifestato a causa di interventi di manutenzione programmata non corretti, cui l'aerogeneratore è stato sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore. Per cui l'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono aver determinato la rottura per fatica dei prigionieri ed al distacco della pala.

4.3.2 Rottura (apertura) dell'estremità di pala

Tutte le pale prodotte sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine costituito da recettori metallici posti all'estremità di pala e lungo l'apertura della 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 drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale.

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. È possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala.

Dalle note operative esposte si può concludere che ha senso effettuare un calcolo di gittata della pala intera in quanto esiste un punto di discontinuità, ossia l'attacco bullonato che unisce la pala al mozzo, ed esiste un'ipotesi, seppur remota, sulla possibilità di cedimento di tale attacco. È da escludere invece, considerate le caratteristiche meccaniche della pala, l'effetto di distacco di una porzione della stessa, in quanto si tratta di una struttura monolitica con la trave di sostegno che rimane vincolata al mozzo attraverso un collegamento bullonato.

5 CALCOLO GITTATA DELLA PALA

Il calcolo della gittata è stato effettuato considerando soltanto i parametri cinematici e geometrici, in particolare è stato studiato il moto parabolico, anche detto moto del proiettile, ovvero il moto di un corpo che partendo con una certa velocità iniziale ed un certo angolo, percorre una traiettoria parabolica sotto l'azione della sola accelerazione di gravità.

I parametri geometrici assunti per il calcolo sono i seguenti:

H = 125 m	Altezza mozzo
L = 73 m	Lunghezza pala
Rg= 25 m	Raggio baricentro, ottenuto assumendo che, in relazione alle caratteristiche della pala e la distribuzione dei pesi, il baricentro sia ad 1/3 rispetto alla lunghezza L della pala
θ (variabile da 0 a 90 °)	Angolo, rispetto all'orizzontale a cui avviene il distacco

$H_g = H + Y_g$ (m)	Altezza del punto baricentrico della pala, dove $Y_g = R_g \sin \theta$, indica la distanza (lungo l'asse y) del baricentro della pala rispetto al mozzo al momento del distacco
$n = 12,6$ rpm	giri al minuto al momento del distacco
$V_g = 21,43$ m/s	Velocità di distacco in corrispondenza del punto baricentrico della pala ottenuta dalla formula $V_g = (2\pi n/60) R_g$
$V_{gx} = V_g \cos \theta$	Velocità lungo l'asse x
$V_{gy} = V_g \sin \theta$	Velocità lungo l'asse y

Tabella 3 – Parametri geometrici assunti per il calcolo della gittata massima

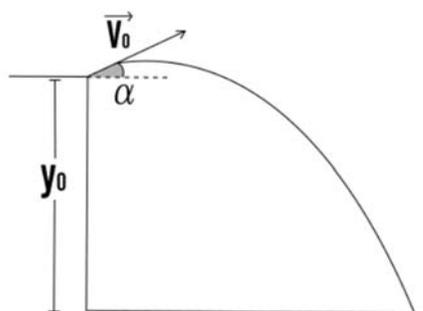
Considerando la tipica traiettoria parabolica di un grave in caduta e le equazioni del moto corrispondente, considerando che il moto lungo l'asse x è rettilineo uniforme e lungo l'asse y è uniformemente accelerato, abbiamo:

$$V_x = V_{0x} \quad X = X_0 + V_{0x}t$$

$$V_y = gt + V_{0y} \quad y = 1/2gt^2 + V_{0y}t + y_0$$

dove ovviamente: g = l'accelerazione di gravità; t = tempo del moto.

Applicando queste formule e risolvendo l'equazione del moto, con una serie di passaggi si perviene alla formula di calcolo della gittata massima.



$$t = \frac{V_g \sin \theta \pm \sqrt{V_g^2 \sin^2 \theta + 2gH_g}}{g}$$

$$X = X_0 + V_0 \cos \theta t$$

Figura 8 – Metodo di calcolo teorico della gittata massima

A seguire il risultato ottenuto mediante l'impiego di un foglio di calcolo, con riprodotte le formule del moto parabolico sotto l'azione della sola accelerazione di gravità, in cui V_{gx} , V_{gy} ed H_g dipendono dall'angolo θ , a cui avviene il distacco della pala e pertanto tale valore sarà calcolato per valori di θ che variano da 0° (pala in orizzontale) a 90° (pala in verticale, con massima estensione in altezza).

Al valore della gittata calcolato con questa formula andrà sommata la distanza X_g del baricentro della pala rispetto all'asse della torre al momento del distacco ($X_g = R_g \cos \theta$) e la distanza del vertice della pala dal baricentro $L_g = 50$ m.

Nella tabella seguente sono indicati i valori della gittata massima al variare dell'angolo θ .

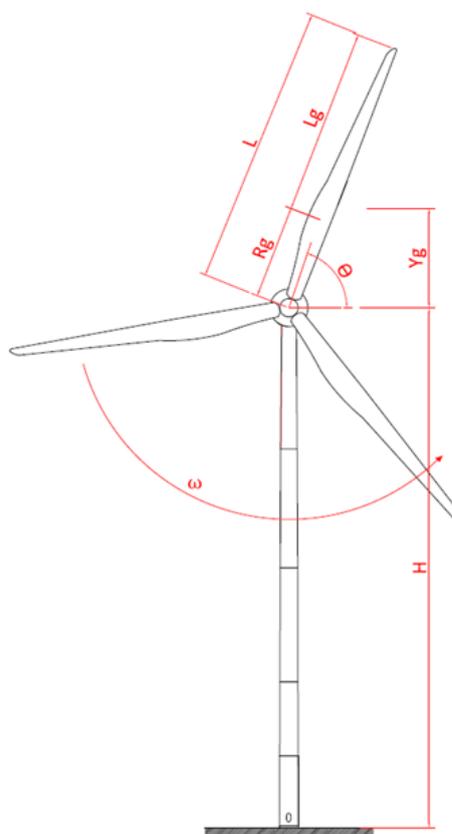


Figura 9 – Parametri geometrici assunti per il calcolo del moto parabolico

Angolo θ	Vgx	Vgy	Hg (H+Yg)	X_g	L_g	Gittata (m)
0	32,97	0,00	125,00	166,44	50,00	216,44
1	32,96	0,58	125,44	168,65	50,00	218,65
2	32,95	1,15	125,87	170,83	50,00	220,83
3	32,92	1,73	126,31	172,97	50,00	222,97
4	32,89	2,30	126,74	175,08	50,00	225,08
5	32,84	2,87	127,18	177,14	50,00	227,14
6	32,79	3,45	127,61	179,16	50,00	229,16

7	32,72	4,02	128,05	181,14	50,00	231,14
8	32,65	4,59	128,48	183,06	50,00	233,06
9	32,56	5,16	128,91	184,94	50,00	234,94
10	32,47	5,73	129,34	186,75	50,00	236,75
11	32,36	6,29	129,77	188,51	50,00	238,51
12	32,25	6,85	130,20	190,21	50,00	240,21
13	32,12	7,42	130,62	191,84	50,00	241,84
14	31,99	7,98	131,05	193,40	50,00	243,40
15	31,85	8,53	131,47	194,89	50,00	244,89
16	31,69	9,09	131,89	196,30	50,00	246,30
17	31,53	9,64	132,31	197,64	50,00	247,64
18	31,36	10,19	132,73	198,90	50,00	248,90
19	31,17	10,73	133,14	200,07	50,00	250,07
20	30,98	11,28	133,55	201,15	50,00	251,15
21	30,78	11,82	133,96	202,15	50,00	252,15
22	30,57	12,35	134,37	203,05	50,00	253,05
23	30,35	12,88	134,77	203,85	50,00	253,85
24	30,12	13,41	135,17	204,56	50,00	254,56
25	29,88	13,93	135,57	205,16	50,00	255,16
26	29,63	14,45	135,96	205,67	50,00	255,67
27	29,38	14,97	136,35	206,06	50,00	256,06
28	29,11	15,48	136,74	206,35	50,00	256,35
29	28,84	15,98	137,12	206,53	50,00	256,53
30	28,55	16,49	137,50	206,59	50,00	256,59
31	28,26	16,98	137,88	206,54	50,00	256,54
32	27,96	17,47	138,25	206,37	50,00	256,37
33	27,65	17,96	138,62	206,08	50,00	256,08

34	27,33	18,44	138,98	205,67	50,00	255,67
35	27,01	18,91	139,34	205,13	50,00	255,13
36	26,67	19,38	139,69	204,48	50,00	254,48
37	26,33	19,84	140,05	203,70	50,00	253,70
38	25,98	20,30	140,39	202,79	50,00	252,79
39	25,62	20,75	140,73	201,75	50,00	251,75
40	25,26	21,19	141,07	200,59	50,00	250,59
41	24,88	21,63	141,40	199,29	50,00	249,29
42	24,50	22,06	141,73	197,87	50,00	247,87
43	24,11	22,49	142,05	196,31	50,00	246,31
44	23,72	22,90	142,37	194,62	50,00	244,62
45	23,31	23,31	142,68	192,81	50,00	242,81
46	22,90	23,72	142,98	190,86	50,00	240,86
47	22,49	24,11	143,28	188,78	50,00	238,78
48	22,06	24,50	143,58	186,56	50,00	236,56
49	21,63	24,88	143,87	184,22	50,00	234,22
50	21,19	25,26	144,15	181,75	50,00	231,75
51	20,75	25,62	144,43	179,15	50,00	229,15
52	20,30	25,98	144,70	176,42	50,00	226,42
53	19,84	26,33	144,97	173,56	50,00	223,56
54	19,38	26,67	145,23	170,57	50,00	220,57
55	18,91	27,01	145,48	167,46	50,00	217,46
56	18,44	27,33	145,73	164,23	50,00	214,23
57	17,96	27,65	145,97	160,87	50,00	210,87
58	17,47	27,96	146,20	157,40	50,00	207,40
59	16,98	28,26	146,43	153,80	50,00	203,80
60	16,49	28,55	146,65	150,09	50,00	200,09

61	15,98	28,84	146,87	146,27	50,00	196,27
62	15,48	29,11	147,07	142,33	50,00	192,33
63	14,97	29,38	147,28	138,29	50,00	188,29
64	14,45	29,63	147,47	134,14	50,00	184,14
65	13,93	29,88	147,66	129,88	50,00	179,88
66	13,41	30,12	147,84	125,53	50,00	175,53
67	12,88	30,35	148,01	121,07	50,00	171,07
68	12,35	30,57	148,18	116,52	50,00	166,52
69	11,82	30,78	148,34	111,88	50,00	161,88
70	11,28	30,98	148,49	107,15	50,00	157,15
71	10,73	31,17	148,64	102,34	50,00	152,34
72	10,19	31,36	148,78	97,44	50,00	147,44
73	9,64	31,53	148,91	92,47	50,00	142,47
74	9,09	31,69	149,03	87,42	50,00	137,42
75	8,53	31,85	149,15	82,31	50,00	132,31
76	7,98	31,99	149,26	77,12	50,00	127,12
77	7,42	32,12	149,36	71,88	50,00	121,88
78	6,85	32,25	149,45	66,58	50,00	116,58
79	6,29	32,36	149,54	61,22	50,00	111,22
80	5,73	32,47	149,62	55,81	50,00	105,81
81	5,16	32,56	149,69	50,36	50,00	100,36
82	4,59	32,65	149,76	44,87	50,00	94,87
83	4,02	32,72	149,81	39,34	50,00	89,34
84	3,45	32,79	149,86	33,78	50,00	83,78
85	2,87	32,84	149,90	28,19	50,00	78,19
86	2,30	32,89	149,94	22,58	50,00	72,58
87	1,73	32,92	149,97	16,95	50,00	66,95

88	1,15	32,95	149,98	11,31	50,00	61,31
89	0,58	32,96	150,00	5,66	50,00	55,66
90	0,00	32,97	150,00	0,00	50,00	50,00

Tabella 4 – Valori risultanti di gittata massima a diversi gradi di angolo θ

Dalla tabella si evince che il valore della gittata massimo ottenuto dal calcolo si ha con l'angolo $\theta = 30^\circ$, per il quale il punto estremo della pala potrà (teoricamente) raggiungere la distanza di circa 256,59 m dal centro della torre tubolare. Sottolineiamo ancora che questo valore è teorico ed altamente conservativo, poiché non tiene in conto le forze di attrito viscoso e la complessità del moto rotazionale, ovvero la rotazione della pala durante il moto di caduta, condizioni reali che attenuano i valori della gittata massima.

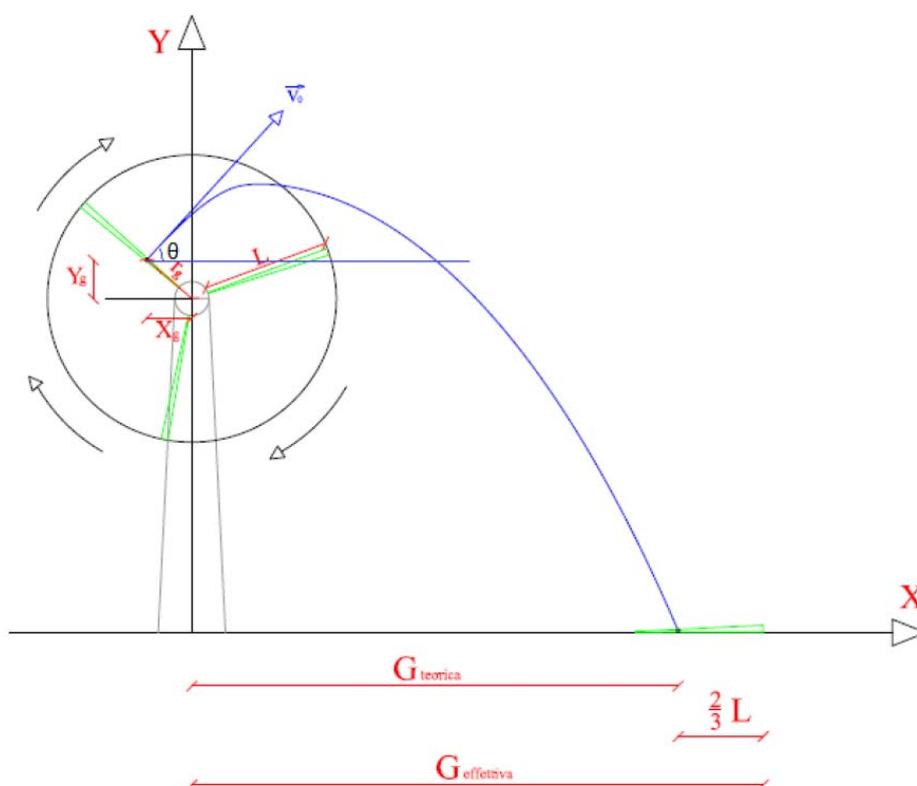


Figura 10 – Rappresentazione della legge di caduta di un grave, lanciato nello spazio con velocità iniziale v_0 e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di θ

Se più realisticamente si considera una riduzione della velocità periferica pari al 35% per tener conto degli effetti della resistenza dovuta al mezzo in cui si svolge il moto (aria) e per considerare le forze di resistenza che si generano al momento di rottura della pala, la gittata teorica è di 171,63 m, per un angolo $\theta = 24^\circ$.

Angolo θ	Vgx	Vgy	Hg (H+Yg)	X _g	L _g	Gittata (m)
0	21,43	0,00	125,00	108,19	50,00	158,19
1	21,43	0,37	125,44	109,18	50,00	159,18
2	21,42	0,75	125,87	110,14	50,00	160,14
3	21,40	1,12	126,31	111,08	50,00	161,08
4	21,38	1,49	126,74	111,98	50,00	161,98
5	21,35	1,87	127,18	112,85	50,00	162,85
6	21,31	2,24	127,61	113,69	50,00	163,69
7	21,27	2,61	128,05	114,49	50,00	164,49
8	21,22	2,98	128,48	115,26	50,00	165,26
9	21,17	3,35	128,91	115,99	50,00	165,99
10	21,10	3,72	129,34	116,68	50,00	166,68
11	21,04	4,09	129,77	117,33	50,00	167,33
12	20,96	4,46	130,20	117,94	50,00	167,94
13	20,88	4,82	130,62	118,51	50,00	168,51
14	20,79	5,18	131,05	119,03	50,00	169,03
15	20,70	5,55	131,47	119,51	50,00	169,51
16	20,60	5,91	131,89	119,94	50,00	169,94
17	20,49	6,27	132,31	120,33	50,00	170,33
18	20,38	6,62	132,73	120,67	50,00	170,67
19	20,26	6,98	133,14	120,96	50,00	170,96
20	20,14	7,33	133,55	121,20	50,00	171,20
21	20,01	7,68	133,96	121,39	50,00	171,39
22	19,87	8,03	134,37	121,52	50,00	171,52
23	19,73	8,37	134,77	121,60	50,00	171,60
24	19,58	8,72	135,17	121,63	50,00	171,63
25	19,42	9,06	135,57	121,60	50,00	171,60

26	19,26	9,39	135,96	121,52	50,00	171,52
27	19,09	9,73	136,35	121,38	50,00	171,38
28	18,92	10,06	136,74	121,18	50,00	171,18
29	18,74	10,39	137,12	120,92	50,00	170,92
30	18,56	10,72	137,50	120,61	50,00	170,61
31	18,37	11,04	137,88	120,23	50,00	170,23
32	18,17	11,36	138,25	119,79	50,00	169,79
33	17,97	11,67	138,62	119,29	50,00	169,29
34	17,77	11,98	138,98	118,73	50,00	168,73
35	17,55	12,29	139,34	118,11	50,00	168,11
36	17,34	12,60	139,69	117,43	50,00	167,43
37	17,12	12,90	140,05	116,68	50,00	166,68
38	16,89	13,19	140,39	115,87	50,00	165,87
39	16,65	13,49	140,73	115,00	50,00	165,00
40	16,42	13,78	141,07	114,06	50,00	164,06
41	16,17	14,06	141,40	113,06	50,00	163,06
42	15,93	14,34	141,73	112,00	50,00	162,00
43	15,67	14,62	142,05	110,87	50,00	160,87
44	15,42	14,89	142,37	109,68	50,00	159,68
45	15,15	15,15	142,68	108,42	50,00	158,42
46	14,89	15,42	142,98	107,11	50,00	157,11
47	14,62	15,67	143,28	105,72	50,00	155,72
48	14,34	15,93	143,58	104,28	50,00	154,28
49	14,06	16,17	143,87	102,77	50,00	152,77
50	13,78	16,42	144,15	101,21	50,00	151,21
51	13,49	16,65	144,43	99,58	50,00	149,58
52	13,19	16,89	144,70	97,89	50,00	147,89

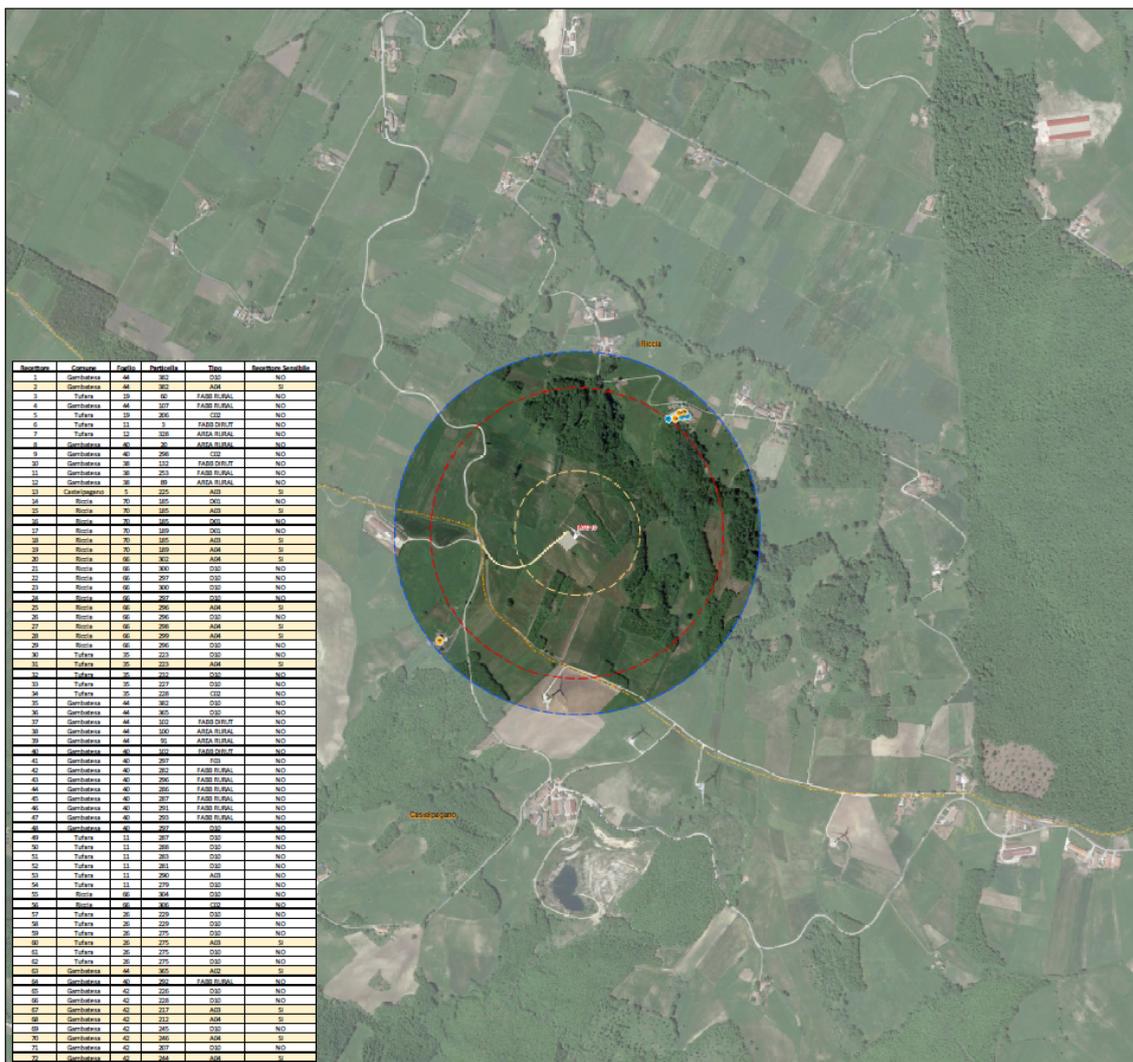
53	12,90	17,12	144,97	96,14	50,00	146,14
54	12,60	17,34	145,23	94,33	50,00	144,33
55	12,29	17,55	145,48	92,46	50,00	142,46
56	11,98	17,77	145,73	90,53	50,00	140,53
57	11,67	17,97	145,97	88,55	50,00	138,55
58	11,36	18,17	146,20	86,51	50,00	136,51
59	11,04	18,37	146,43	84,42	50,00	134,42
60	10,72	18,56	146,65	82,27	50,00	132,27
61	10,39	18,74	146,87	80,07	50,00	130,07
62	10,06	18,92	147,07	77,82	50,00	127,82
63	9,73	19,09	147,28	75,51	50,00	125,51
64	9,39	19,26	147,47	73,16	50,00	123,16
65	9,06	19,42	147,66	70,76	50,00	120,76
66	8,72	19,58	147,84	68,31	50,00	118,31
67	8,37	19,73	148,01	65,82	50,00	115,82
68	8,03	19,87	148,18	63,29	50,00	113,29
69	7,68	20,01	148,34	60,71	50,00	110,71
70	7,33	20,14	148,49	58,09	50,00	108,09
71	6,98	20,26	148,64	55,43	50,00	105,43
72	6,62	20,38	148,78	52,74	50,00	102,74
73	6,27	20,49	148,91	50,01	50,00	100,01
74	5,91	20,60	149,03	47,25	50,00	97,25
75	5,55	20,70	149,15	44,45	50,00	94,45
76	5,18	20,79	149,26	41,63	50,00	91,63
77	4,82	20,88	149,36	38,77	50,00	88,77
78	4,46	20,96	149,45	35,89	50,00	85,89
79	4,09	21,04	149,54	32,99	50,00	82,99

80	3,72	21,10	149,62	30,06	50,00	80,06
81	3,35	21,17	149,69	27,12	50,00	77,12
82	2,98	21,22	149,76	24,15	50,00	74,15
83	2,61	21,27	149,81	21,17	50,00	71,17
84	2,24	21,31	149,86	18,17	50,00	68,17
85	1,87	21,35	149,90	15,16	50,00	65,16
86	1,49	21,38	149,94	12,14	50,00	62,14
87	1,12	21,40	149,97	9,11	50,00	59,11
88	0,75	21,42	149,98	6,08	50,00	56,08
89	0,37	21,43	150,00	3,04	50,00	53,04
90	0,00	21,43	150,00	0,00	50,00	50,00

Tabella 5 – Valori teorici risultanti di gittata massima a diversi gradi di angolo θ (con riduzione della velocità periferica pari al 35% per tener conto della resistenza del mezzo)

6 VERIFICA INTERFERENZE NELL'AREA SOTTESA DALLA GITTATA MASSIMA

Nelle immagini successive, si riporta l'area di buffer costruita assumendo una distanza dal singolo aerogeneratore pari a: gittata massima della pala; Buffer di 400 m - Let. "C" Punto 16.1 Parte IV DGR 621/2011 e 500 m dell'Area di studio.



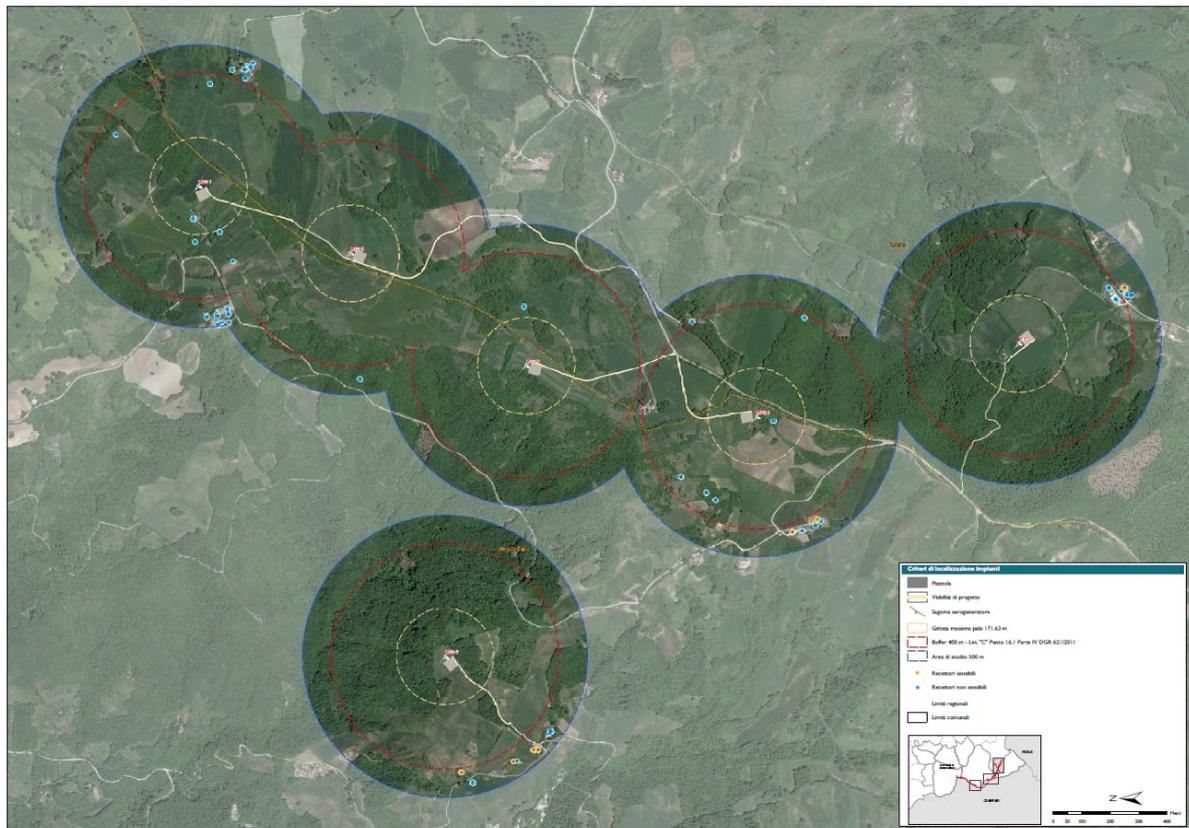
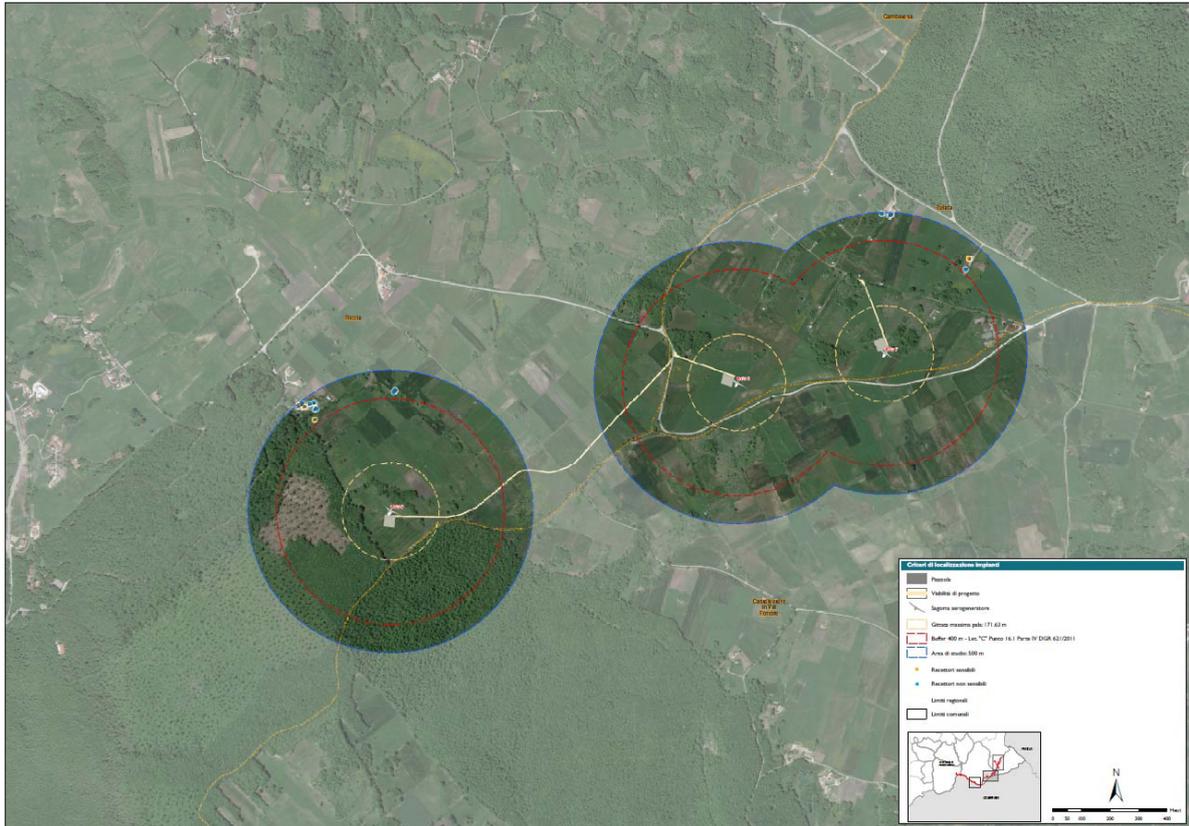


Figura 11 – Inquadramento delle WTG all'interno dei buffer costruiti a partire dai singoli aerogeneratori (Stralcio dell'elaborato 2022030_1.8.1.2_DGR_621-Let_C-2011)

Si evidenzia che i recettori sensibili presenti nelle aree prossime agli aerogeneratori di progetto ricadono tutti all'esterno del buffer di 400 m costruito tenendo in considerazione la Let. "C" Punto 16.1 Parte IV DGR 62/2011. Per ulteriori approfondimenti si rimanda all'elaborato cartografico 1.8.1.2_DGR_621_C-2011.

7 CONCLUSIONI

La definizione del moto di una pala di un aerogeneratore è un problema alquanto complesso. È certo sulla base dell'esperienza e di semplici considerazioni fisiche (conservazione della quantità di moto) che trattasi di un moto rotazionale complesso in un fluido viscoso (aria).

Dal momento che sono stati considerati per ciascun parametro valori ampiamente conservativi e mettendosi nelle condizioni di esercizio più gravose (massima velocità di rotazione, massima velocità del vento), il valore della gittata calcolato si può considerare ampiamente conservativo, pertanto da considerarsi quale Gittata Massima.

Il calcolo è stato poi eseguito risolvendo le stesse equazioni nel caso in cui il distacco fosse riferito a frammenti di pala, benché tale evento è da considerarsi pressoché impossibile.

Dai calcoli è risultato che la massima gittata degli elementi rotanti che possono essere proiettati dagli aerogeneratori in progetto è 171,63 metri