



PROPONENTE

IVPC



IVPC S.r.l.
Sede legale : 80121 Napoli (NA) - Vico Santa Maria a Cappella Vecchia 11
Sede Operativa : 83100 Avellino - Via Circumvallazione 108
Indirizzo email ivpc@pec.ivpc.com

I.V.P.C. S.r.l.

Vico Santa Maria a Cappella Vecchia, 11
80121 Napoli

P.IVA: 01895480646



OPERA

**PROGETTO PER IL RIFACIMENTO E POTENZIAMENTO
DI UN PARCO EOLICO ESISTENTE NEL COMUNE DI ALBERONA**

OGGETTO

TITOLO ELABORATO :
**RELAZIONE DI CALCOLO SULLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI E
ANALISI DI IMPATTO SUI RICETTORI**

DATA : Marzo 2024

N°/CODICE ELABORATO :

R_03

SCALA :

Tipologia : R (Relazione)

Formato :

Lingua : ITALIANO

I TECNICI

Progettazione generale
e progettazione elettrica
Coordinamento progetto



STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA

MEZZINA dott. ing. Antonio

Via Tiberio Solis n.128 | 71016 San Severo (FG)

Tel. 0882.228072 | Fax 0882.243651

e-mail: info@studiomezzina.net | web: www.studiomezzina.net



Consulenza
archeologica



NOSTOI s.r.l.

Dott.ssa Maria Grazia Liseno

Tel. 0972.081259 | Fax 0972.83694

E-Mail: mgliseno@nostoisrl.it

Consulenza idraulica geologica
e geotecnica

Dott. Nazario Di Lella

Tel./Fax 0882.991704 | cell. 328 3250902

E-Mail: geol.dilella@gmail.com

Consulenza
strutturale



Ing. Tommaso Monaco

Tel. 0885.429850 | Fax 0885.090485

E-Mail: ing.tommaso@studiotecnicomonaco.it

Consulenza
topografica

Geom. Matteo Occhiochiuso

Tel. 328 5615292

E-Mail: matteo.occhiochiuso@virgilio.it

Consulenza
acustica

STUDIO FALCONE
Ingegneria

Ing. Antonio Falcone

Tel. 0884.534378 | Fax. 0884.534378

E-Mail: antonio.falcone@studiofalcone.eu

Consulenza Analisi paesaggistica
e studio di impatto ambientale

Dott. Agr. Pasquale Fausto Milano

Tel. 3478880757

E-Mail: milpaf@gmail.com

02	Marzo 2024	Revisione progettuale per ottimizzazione layout	Studio Mezzina	IVPC s.r.l.
01	Luglio 2023	Rimissione progetto definitivo a seguito integrazione del Mase	Studio Mezzina	IVPC s.r.l.
00	Settembre 2022	Emissione progetto definitivo	Studio Mezzina	IVPC s.r.l.
N° REVISIONE	DATA	OGGETTO DELLA REVISIONE	ELABORAZIONE	APPROVAZIONE



STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA
 MEZZINA dott. ing. Antonio
 Via T. Solis, 128 - 71016 San Severo (FG)
 P. IVA 02037220718
 ☎ 0882-228072 / 📠 0882-243651
 ✉ info@studiomezzina.net



PROPONENTE:

IVPC S.r.l.

Società Unipersonale

Sede legale : 80121 Napoli (NA) - Vico Santa Maria a Cappella Vecchia 11

Sede Operativa : 83100 Avellino - Via Circumvallazione 108

PEC: ivpc@pec.ivpc.com

C.F. e P.IVA: 01895480646



PROGETTO DEFINITIVO PER IL RIFACIMENTO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA COMPLESSIVA DI 61,00MW COSTITUITO DA N. 10 AEROGENERATORI TIPO GE 158 DA 6.1MW SITO NEL COMUNE DI ALBERONA (FG), NONCHÉ DELLE OPERE CONNESSE E DELLE INFRASTRUTTURE INDISPENSABILI ALLA COSTRUZIONE E ALL'ESERCIZIO DELL'IMPIANTO.

RELAZIONE TECNICA SPECIALISTICA

Calcolo della gittata massima di elementi rotanti per rottura accidentale della pala e suoi frammenti e verifica rispetto ai recettori sensibili individuati

STATO DELLE REVISIONI DEL DOCUMENTO			
N. Progressivo	Revisione	Data	Oggetto Emissione
1	00	09/09/2022	Prima emissione progetto definitivo
2	01	31/07/2023	Revisione progetto a seguito richieste integrazione del MASE
3	02	27/02/2024	Revisione progettuale per ottimizzazione layout



STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA
MEZZINA dott. ing. Antonio
Via T. Solis, 128 - 71016 San Severo (FG)
P. IVA 02037220718
☎ 0882-228072 / 📠 0882-243651
✉: info@studiomezzina.net



INDICE RELAZIONE

Sommario

1. **OGGETTO.3**
2. **PREMESSA.5**
3. **INQUADRAMENTO DELL'IMPIANTO.9**
4. **CARATTERISTICHE DELL'AEROGENERATORE.12**
5. **METODO UTILIZZATO PER IL CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA14**
 - 5.1 **Ipotesi.14**
 - 5.2 **Modello di calcolo18**
6. **RISULTATI DEL CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER ROTTURA DELL'INTERA PALA22**
7. **CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER DISTACCO DEI FRAMMENTI DI PALA24**
 - 7.1 **Rottura di un frammento di pala distante 10 m dalla punta della pala24**
 - 7.2 **Rottura di un frammento di pala distante 5 m dalla punta della pala25**
8. **RIEPILOGO DEI RISULTATI OTTENUTI26**
 - 8.1 **Distanze dai principali elementi sensibili dell'area27**
9. **CONCLUSIONI.32**



1. OGGETTO.

La presente relazione è relativa alla progettazione definitiva in seno al procedimento autorizzativo del “Progetto per il rifacimento e potenziamento di un parco eolico” che la **IVPC S.r.l.** intende realizzare in territorio di Alberona e Volturino in provincia di Foggia.

Questa relazione costituisce la revisione della precedente Rev. 01 del 31/07/2023 già emessa come revisione della precedente Rev. 00 del 09/09/2022 relativa all’iniziale progetto definitivo dell’impianto già sottoposto a VIA al Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE): **prot. MITE-112166 del 15/09/2022 ID8919.**

Il MASE, con propria nota **Prot. N. 7512 del 27/06/2023** richiedeva precisazioni e integrazioni al progetto; per ottemperare alle quali si è reso necessario una revisione del layout di progetto con riduzione del numero complessivo di aerogeneratori da 18, previsti nell’iniziale progetto definitivo, a 12 previsti nella revisione progettuale della quale fa parte il presente documento. La relazione relativa a questa revisione del progetto è la Rev. 01 del 31/07/2023.

A seguito dei primi riscontri avuti sul progetto da parte degli Enti valutatori, la IVPC S.r.l. ha inteso procedere con una ulteriore revisione del progetto consistente in:

1. Eliminazione degli aerogeneratori ALB01 e ALB03;
2. Spostamento di circa 65m dell’aerogeneratore ALB05;
3. Spostamento di circa 265m dell’aerogeneratore ALB08;
4. Spostamento di circa 170m dell’aerogeneratore ALB10;

Pertanto, l’impianto, nella nuova configurazione, sarà composto da n. 10 aerogeneratori, ciascuno della potenza di 6,1MW, con diametro del rotore di 158m, altezza di mozzo 101m e altezza complessiva (TIP) di 180m; la potenza complessiva del parco eolico è quindi pari a 61,00 MW. Il nuovo layout prevede la dislocazione territoriale degli aerogeneratori nel territorio di Alberona. Gli aerogeneratori da dismettere per il rifacimento di che trattasi, sono tutti ubicati nel comune di Alberona.

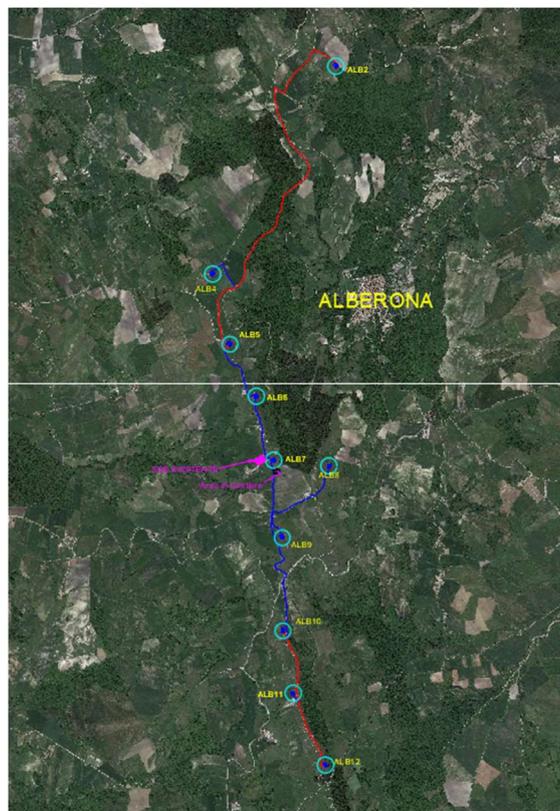


Fig. 1. Inquadramento planimetrico del parco eolico su ortofoto.

A seguito degli studi effettuati sull'area in esame (analisi orografiche, anemologiche, geologiche, connessione alla rete elettrica, acustici, archeologici, etc.) e in funzione dell'obiettivo di ottimizzare il rendimento economico dell'impianto, si è concluso che per l'impianto in oggetto possano essere utilizzati aerogeneratori di grossa taglia. Tutte le turbine scelte da IVPC sono sempre certificate a livello internazionale, generalmente dalla Germanischer Lloyd, DNV o da altro organismo equivalente. Questa certificazione è essenziale per garantire la bancabilità del progetto e la sicurezza al paese che le turbine produrranno l'energia prevista essendo anche la curva di potenza, $P = f(v_{\text{vento}})$, certificata.

La turbina utilizzata il progetto di rifacimento del parco eolico di che trattasi è della GENERAL ELECTRIC tipo GE158 con potenza di 6,1 MW, diametro del rotore di 158m, altezza di mozzo di 101m e quindi altezza complessiva al tip di 180m.

Il modello di turbina scelto è al momento il più performante sul mercato in relazione al sito di installazione in esame.

Scopo della presente relazione è la determinazione della gittata massima degli elementi rotanti del nuovo aerogeneratore proposto in caso di rottura accidentale dell'intera pala o suoi frammenti.



2. PREMESSA.

La reale distanza raggiungibile da una pala - ovvero da frammenti di essa - distaccatasi dal rotore di un aerogeneratore, è funzione di un gran numero di variabili, che vanno dall'effettiva velocità istantanea del rotore nel momento del lancio alle condizioni meteo-anemometriche, dalle effettive dimensioni, massa e forma del frammento alla posizione assunta al momento del distacco, passando per l'influenza dei moti turbolenti determinati dalla rototraslazione del proietto.

Nel presente studio si è inteso affrontare il problema non solo semplicemente dal punto di vista cinematico del modello aerogeneratore-terreno circostante, ma anche dinamico prendendo in considerazione anche le forze di attrito viscoso dovuto al movimento nell'aria del corpo, nonché le azioni aero-fluido-dinamiche ; si è pertanto utilizzato un modello che tenesse conto di queste azioni, precisando che per le azioni aerodinamiche, data la loro particolare complessità, si sono dovute fare necessariamente delle ipotesi semplificative, ma comunque a favore della sicurezza, come sarà meglio dettagliato in seguito. In quest'ottica, data l'impossibilità di conoscere compiutamente le condizioni al contorno del problema, l'approccio adottato alla valutazione della gittata massima deve necessariamente ricondursi ad alcune ipotesi rappresentative, ormai universalmente adottate nella letteratura e studi di questo settore, facendo riferimento a tre eventi esemplificativi:

1. Rottura (distacco) dell'intera pala (blade – lama);
2. Rottura di un frammento di pala corrispondente agli ultimi suoi 10 m verso la punta;
3. Rottura di un frammento di pala corrispondente agli ultimi suoi 5 m verso la punta;

Di tali casi, il **primo costituisce senz'altro quello probabilisticamente più rilevante** in ragione della discontinuità strutturale costituita dalla giunzione della pala alla flangia del mozzo a mezzo di collegamenti a vite; gli altri due casi sono probabilisticamente molto meno rilevanti. Pur tuttavia la prassi progettuale degli impianti eolici li porta a considerare comunque.

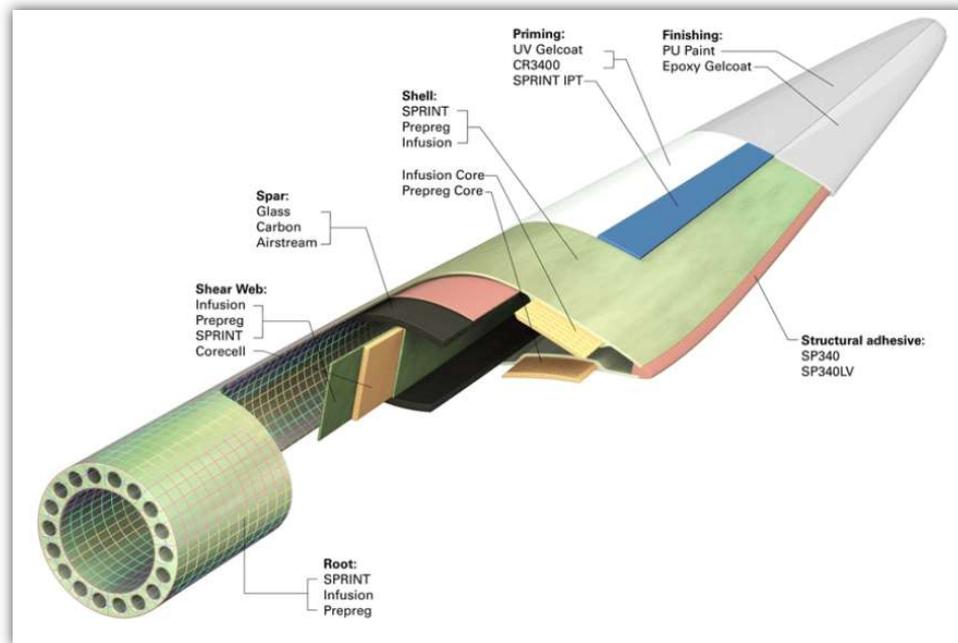


Fig. 2. Pala in composito di un aerogeneratore

I casi di rottura di frammenti, anche in virtù della caratteristica costitutiva della pala che è realizzata con fibre strutturali in matrici sintetiche e quindi caratterizzate da rotture di tipo plastico e non fragile, si riferiscono di norma a parti del rivestimento alare che potrebbero, in caso di urto o folgorazione, staccarsi dal resto della struttura; tuttavia la casistica è numericamente bassissima, come testimoniato dallo studio di 1578 casi reali registrati in Nord America ed in Europa da uno studio commissionato dalla Vestas all'ente indipendente **BP Power**, secondo il quale la probabilità di un evento accidentale si attesta su 1.6×10^{-5} per turbina all'anno.¹ Ulteriori e più recenti studi, anche accademici, di rilevanza internazionale, confermano questi dati, come qui di seguito brevemente illustrato mediante grafici e tabelle bibliografate:

¹ Anche secondo studi più recenti le probabilità hanno quest'ordine di grandezza. Secondo Larwood and van Dam (2006) da $4,2 \times 10^{-4}$ a 5.4×10^{-6} .

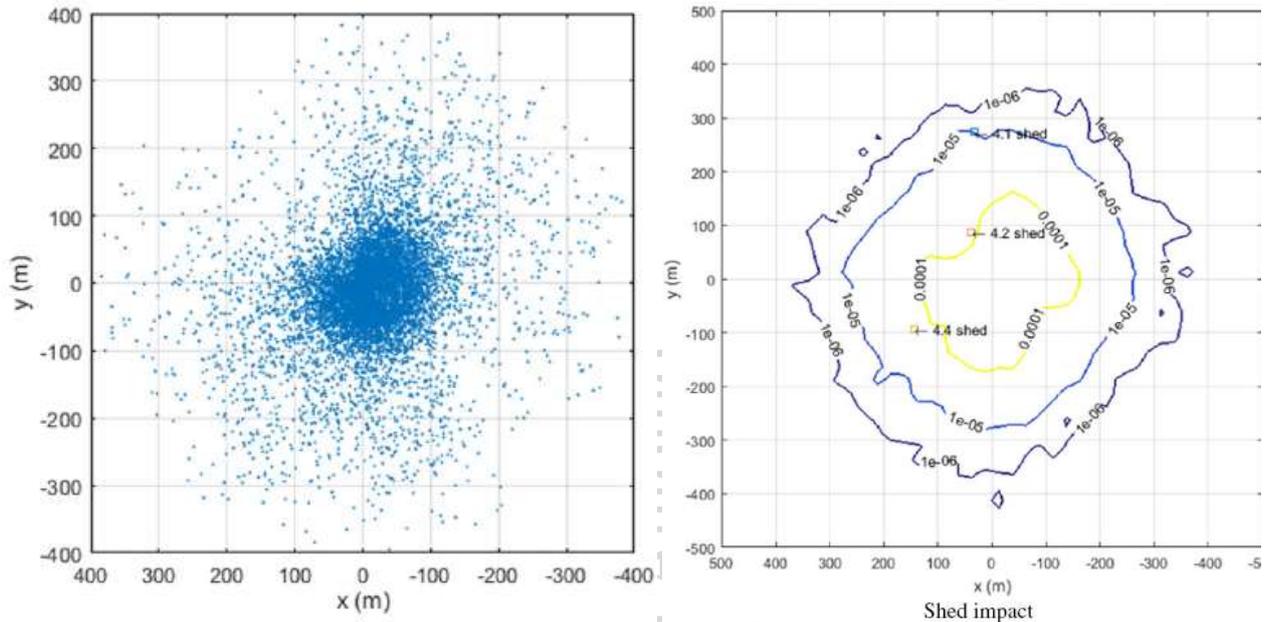


Fig. 3. A sx: Distribuzione dei punti di impatto su 10.000 simulazioni per una turbina test.
 A dx: relative probabilità di impatto rispetto ad una costruzione di pianta 25x25 ed altezza 3.67m².

Operating Condition	Probability Per Turbine Per Year
Nominal operating rpm	4.2×10^{-4}
Braking (1.25 times nominal rpm)	4.2×10^{-4}
Emergency (2.0 times nominal rpm)	5×10^{-6}

Tab. 1. Probabilità di rottura in relazione alla velocità di rotazione secondo Braam ed altri³

² Cfr. *Analysis of blade fragment risk at a wind energy facility*, Scott Larwood e David Simms, 2017

³ Braam H, van Mulekom GJ, Smit RW. Handboek - *Risicozonering Windturbines*: The Netherlands; 2005.

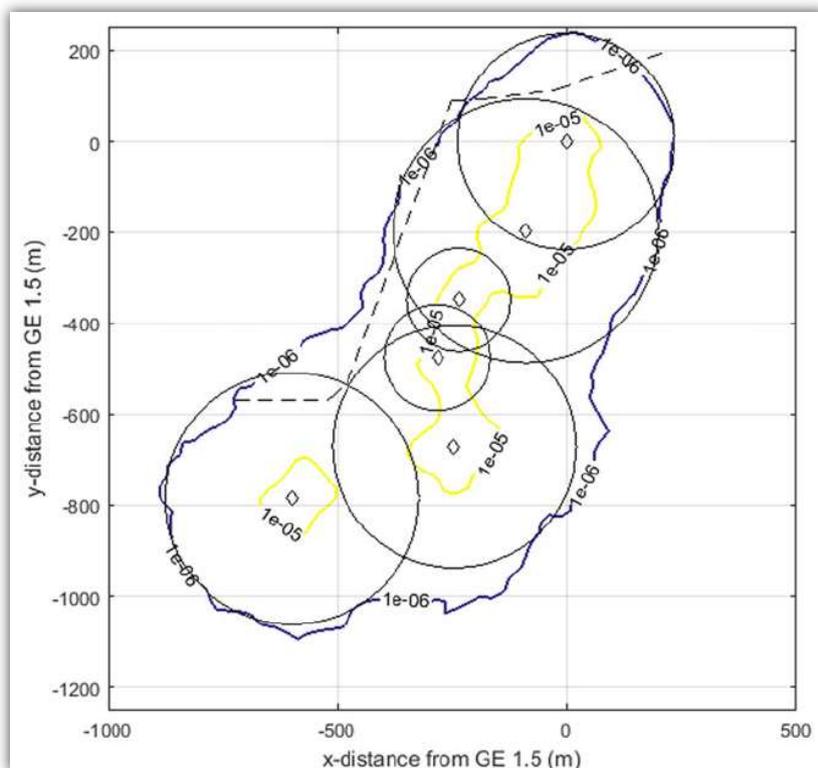


Fig. 4. Involuppo delle probabilità di impatto per un parco costituito da macchine di varia taglia (rotori da 35 a 106m) ⁴

Come evidente da quanto sopra riportato, la probabilità di impatto tra un frammento di pala ed un oggetto situato tra 250 ed i 500m è compresa tra 1×10^{-5} e 1×10^{-6} eventi per anno, rientrando nella classificazione di evento estremamente remoto.

Il rischio associato è classificabile mediante matrice di rischio tra “basso” e “minimo”:

		Likelihood					
		Frequent	Reasonably Probable	Occasional	Remote	Extremely Remote	Improbable
Consequence	Catastrophic	High	High	High	Moderate	Low	Routine
	Critical	High	High	Moderate	Low	Low	Routine
	Marginal	Moderate	Moderate	Low	Low	Routine	Routine
	Negligible	Routine	Routine	Routine	Routine	Routine	Routine

A solo titolo di paragone, la possibilità di un edificio di essere colpito da un fulmine è collocabile tra 1×10^{-3} e 1×10^{-4} ⁵ pertanto di almeno un ordine di grandezza superiore.

⁴ Cfr. *Analysis of blade fragment risk at a wind energy facility*, Scott Larwood e David Simms, 2017

⁵ Cfr *Determining the Probability of Lightning Striking a Facility*, R.T. Hasbrouck, PE, National Lightning Safety Institute, 2004 - http://lightningsafety.com/nlsi_lhm/prbshort.html

**STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA**
MEZZINA dott. ing. Antonio
Via T. Solis, 128 - 71016 San Severo (FG)
P. IVA 02037220718
☎ 0882-228072 / 📠 0882-243651
✉ info@studiomezzina.net



3. INQUADRAMENTO DELL'IMPIANTO.

L'impianto eolico sarà composto da n° 10 aerogeneratori, tutti localizzati in provincia di Foggia nel comune di Alberona.

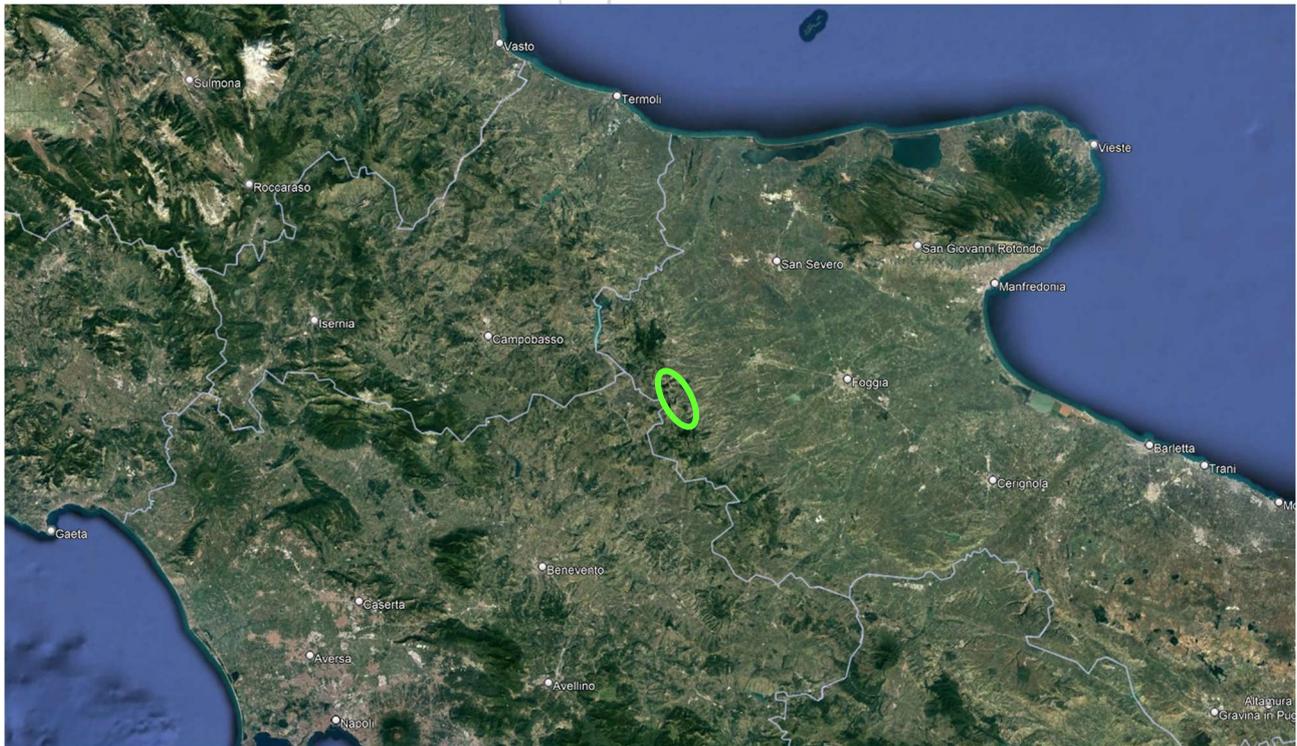


Fig. 5. Inquadramento di ampio raggio su ortofoto dell'area di intervento (punto verde), situata nel cuore dell'Appennino.

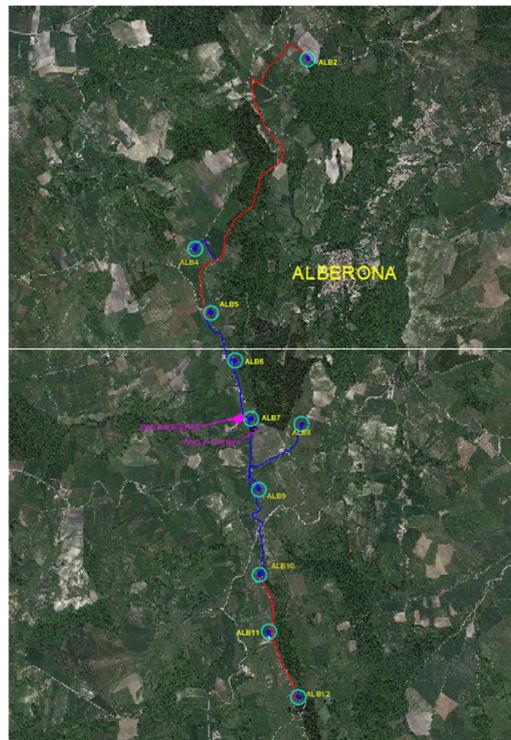


Fig. 6. Inquadramento su ortofoto del parco, situato nel comune di Alberona; in ciano, gli aerogeneratori; in rosso e blu le tratte di elettrodotti MT.
 La zona delle installazioni è situata in zona di media montagna, ad una altitudine media di circa 925m s.l.m., con quote variabili da un minimo di circa 865 ad un massimo di circa 1000m sul livello del mare. Le caratteristiche di ventosità del sito lo rendono idoneo all'installazione di un impianto per la produzione di energia dal vento, come da analisi anemometriche effettuate in loco.
 Nelle Figure seguenti l'area interessata dagli aerogeneratori è individuata su IGM.

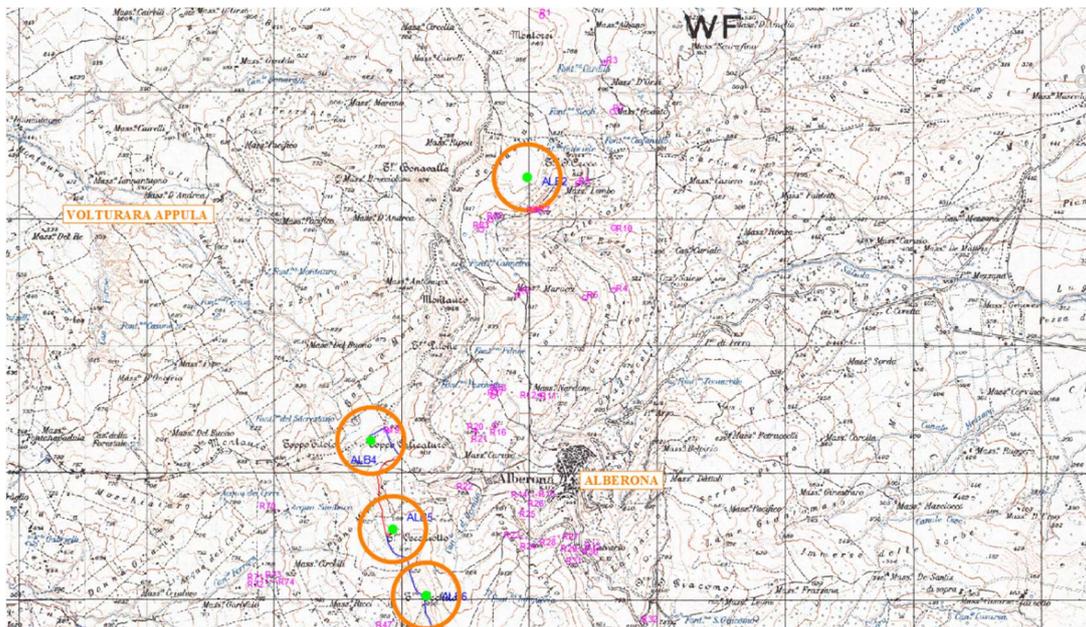


Fig. 7. Inquadramento geografico su base IGM degli aerogeneratori del parco eolico: in verde l'area spazzata dagli aerogeneratori; in arancio la circonferenza di massima gittata (285m, calcolata come verrà ampiamente descritto in appresso); in magenta i ricettori sensibili individuati.

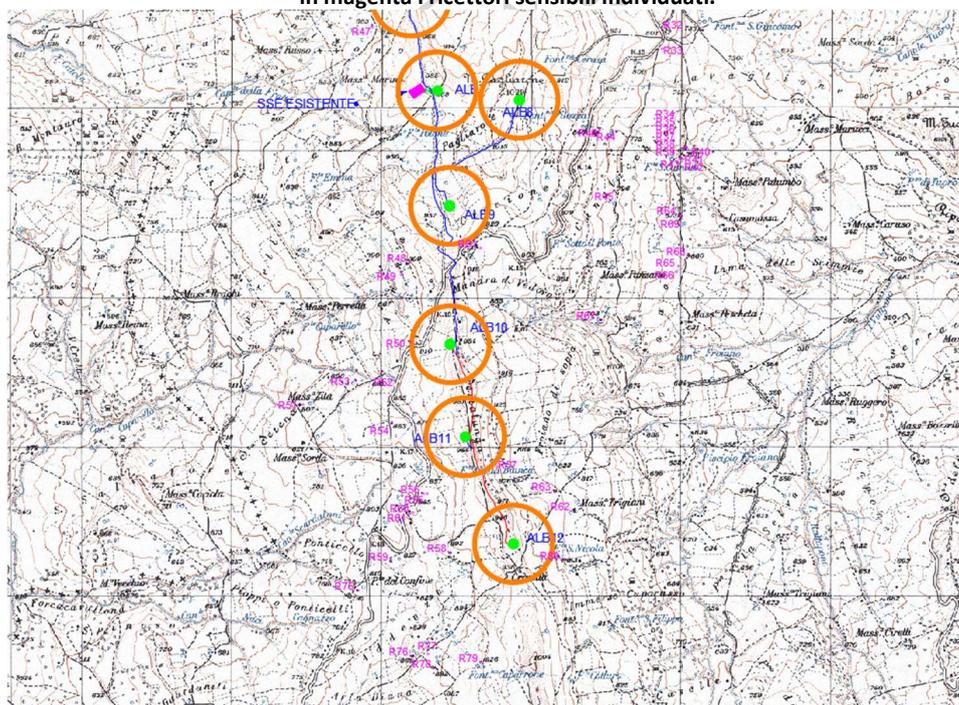


Fig. 8. Inquadramento geografico su base ortofoto degli aerogeneratori del parco eolico: in verde l'area spazzata dagli aerogeneratori; in arancio la circonferenza di massima gittata (285m, calcolata come verrà ampiamente descritto in appresso); in magenta i ricettori sensibili individuati.

Denominazione	Comune	UTM - EST [m]	UTM - NORD [m]	altitudine [m s.l.m.]
ALB02	Alberona	4589132	509921	863
ALB04	Alberona	4587056	508695	921
ALB05	Alberona	4586423	508860	912
ALB06	Alberona	4585834	509131	950
ALB07	Alberona	4585206	509307	969
ALB08	Alberona	4584913	509721	1018
ALB09	Alberona	4584431	509388	978
ALB10	Alberona	4583671	509403	935
ALB11	Alberona	4582878	509494	956
ALB12	Alberona	4582157	509816	952

Tab. 2. Denominazione, posizione ed altitudine dei 10 aerogeneratori

4. CARATTERISTICHE DELL'AEROGENERATORE.

Come sopra già descritto, l'impianto eolico proposto sarà costituito da n. 10 aerogeneratori della potenza uninominale di 6.1MW, con altezza di mozzo (h_n) pari a 101 m, diametro del rotore di 158m e lunghezza della singola pala (blade) di 77,40 m; in Fig. 9 è riportato lo schema dimensionale di un aerogeneratore con tali dimensioni.

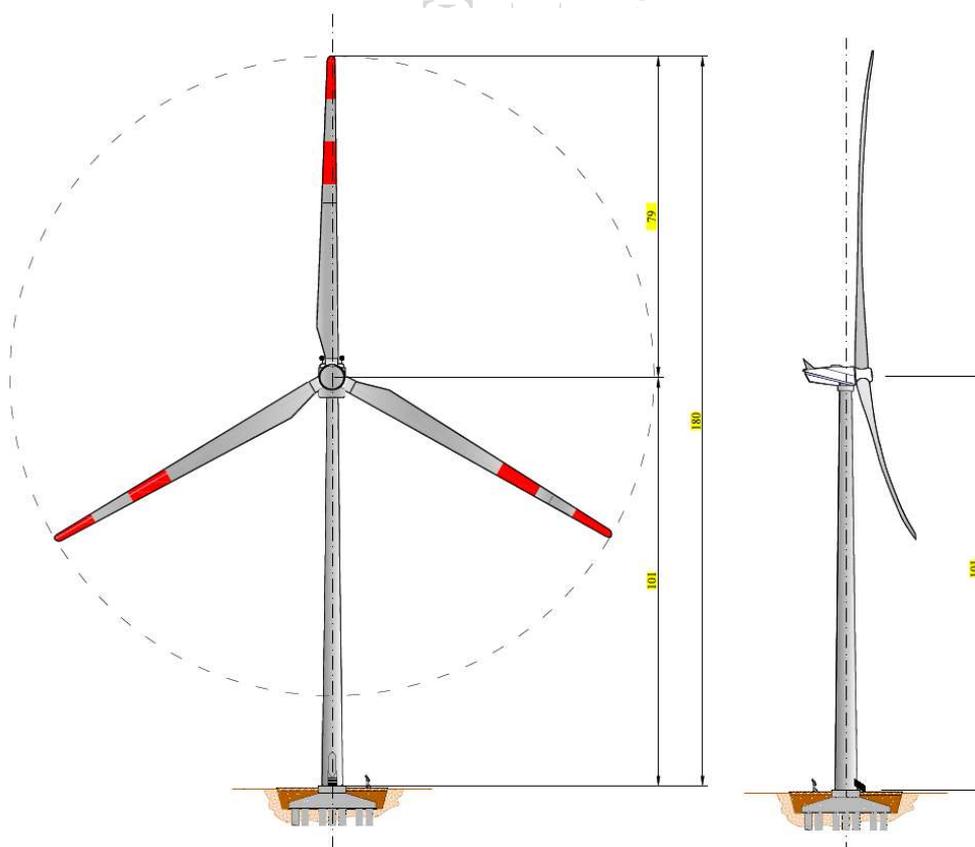


Fig. 9. Schema dimensionale dell'aerogeneratore ipotizzato da IVPC.



Come sopra accennato, l'aerogeneratore utilizzato è della General Electric tipo GE158, le cui caratteristiche principali che rilevano ai fini della presente relazione sono riportate nella scheda tecnica di **Fig. 10**.

Dal data sheet di **Fig. 10** si rileva che la velocità tangenziale massima alla punta della pala è pari a **82 m/s** a cui corrisponde una velocità angolare di **9,9 giri/min**. Tale valore è anche rilevabile direttamente da un altro data sheet dell'aerogeneratore: quello inerente le caratteristiche di emissione acustica dell'aerogeneratore riportato in **Fig. 11**. Da quest'ultimo data sheet si evince non solo che effettivamente la massima velocità angolare dell'aerogeneratore è di 9,9 giri/min, ma che al fine di ridurre le emissioni acustiche è possibile anche regolare la velocità di rotazione operativa della macchina. **Al contrario, ciò significa che è possibile ridurre la velocità di rotazione del rotore al fine, ad esempio, qualora necessario ridurre la gittata degli elementi rotanti e quindi rendere compatibile l'aerogeneratore rispetto a eventuali recettori sensibili presenti nelle vicinanze.** E' possibile la regolazione fino ad una minore velocità di rotazione di 6,26 m/s (modo operativo per massimo livello di emissione acustica di 98 dB(A)). Ovviamente a questa riduzione di velocità corrisponde anche ad una riduzione di potenza, ma questo prezzo serve per rendere compatibile con l'ambiente una macchina che viceversa non potrebbe essere installata. Infine, è da rilevare che la regolazione di velocità (e quindi di gittata e di emissione acustica) è applicabile in modo discontinuo sia in funzione dei quadranti di imbardata del rotore che in funzione della velocità del vento in un dato momento.

GE Renewable Energy - Original Document - WT General Description

3 Technical Data for the Cypress Wind Turbines

Turbine	4.2/4.5/4.8/5.0/5.2/5.3/5.5/5.8/6.1/6.3 - 158
Rated output [MW]	4.2/4.5/4.8/5.0/5.2/5.3/5.5/5.8/6.1/6.3
Rotor diameter [m]	158
Number of blades	3
Swept area [m ²]	19607
Rotational direction (viewed from an upwind location)	Clockwise
Maximum speed of the blade tips [m/s]	50Hz - 82.0 m/s 60Hz - 83.6 m/s
Orientation	Upwind
Speed regulation	Pitch control
Aerodynamic brake	Full feathering
Color of outer components	RAL 7035 (light grey) and RAL 7023 (concrete grey, for concrete sections of hybrid tower only)
Reflection degree/Gloss degree Steel tower	30 - 60 gloss units measured at 60° as per ISO 2813
Reflection degree/Gloss degree Rotor blades, Nacelle, Hub	60 - 80 gloss units measured at 60° as per ISO 2813
Reflection degree/Gloss degree Hybrid Tower	Concrete gray (similar RAL 7023); gloss matte

Table 1: Technical data Cypress-158 wind turbine

Fig. 10. Estratto dal data sheet di una GE158 Cypress.



Nominal Sound Power Level (dBA)	Nominal Rotor Speed (rpm)	Nominal Electrical Power (kW) for each Hub Height					
		101.0m	120.9m	141.0m	150.0m	151.0m	161.0m
107.0	9.90	4800 - 6100*	4800 - 6100*	N/A	N/A	4800 - 6100*	4800 - 6100*
106.0	9.70	4800 - 6300*	4800 - 6300**	4800 - 6300*	4800 - 6300*	4800 - 6300*	4800 - 6300*
105.0	9.35	4800 - 5300	N/A	4800 - 5300	4800 - 5300	4800 - 5300	4800 - 5300
104.0	9.00	4800 - 5100*	N/A	4800 - 5100	4800 - 5100	4800 - 5100	4800 - 5100*
103.0	8.54	4800	4800*	4800*	4800	4800	4800
102.0	8.20	4650	4650	N/A	4650	4650	4650
101.0	7.66	4300	4300	N/A	4300	N/A	4300
100.0	7.22	4042	4042	4042*	4042	N/A	4042
99.0	6.70	3507	3507	3507	3507	3507	3507
98.0	6.26	3098	3098	3098	3098	3098	3098

Table 1: Overview of configurations for each apparent sound power level.

Fig. 11. Livelli di emissione acustica di una GE158 Cypress.

I calcoli della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura vengono eseguiti per una velocità di rotazione di 10 giri/min.

$$Rpm_{max} = 10 \text{ giri/min}$$

Al fine di valutare anche la gittata massima alle condizioni di minima velocità di rotazione del rotore, nell'ambito delle possibilità operative di regolazione della macchina, viene effettuato il calcolo anche per una velocità di rotazione di 6,5 giri/min.

$$Rpm_{min} = 6,5 \text{ giri/min}$$

5. METODO UTILIZZATO PER IL CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

Per il calcolo della distanza massima raggiunta dalla pala o da parti di essa dopo il distacco dall'aerogeneratore è necessario effettuare alcune assunzioni esemplificative e, per quanto possibile, conservative.

Il calcolo descritto nel seguito determina il punto di impatto con il terreno rispetto all'aerogeneratore (gittata massima), al fine di verificare la compatibilità dell'opera con gli insediamenti abitativi e le infrastrutture più prossime agli aerogeneratori.

5.1 Ipotesi.

L'ipotesi di partenza è che la pala o un suo frammento si distacchi accidentalmente mentre il rotore è in movimento nelle peggiori condizioni, ovvero alla massima velocità angolare ammessa dai sistemi di controllo ed arresto della macchina.



Il moto risultante sarà quello di un corpo libero, soggetto alla forze inerziali, di gravità ed alle forze aerodinamiche; queste ultime sono determinate non solo dal moto proprio del corpo (velocità assoluta rispetto al sistema di riferimento adottato) ma anche dall'influenza del vento e sue raffiche (velocità relativa) e dalla posizione assunta dal corpo rispetto alla direzione principale di avanzamento; discreta rilevanza possiede anche l'incremento delle perdite in regime turbolento determinate dalla rotazione del corpo attorno ai propri assi principali di inerzia; tali perdite non sono linearmente dipendenti dalla velocità di eiezione ed avanzamento e se ne terrà conto con opportuni coefficienti correttivi analitici sperimentali. La dinamica del moto, come affermato in premessa, è estremamente complessa in quanto governata da numerose variabili come la forma della superficie palare ovvero del suo frammento, la massa e la sua distribuzione, gli angoli di incidenza e di swirl, alcuni dei quali non controllabili e non prevedibili come nel caso del vento.

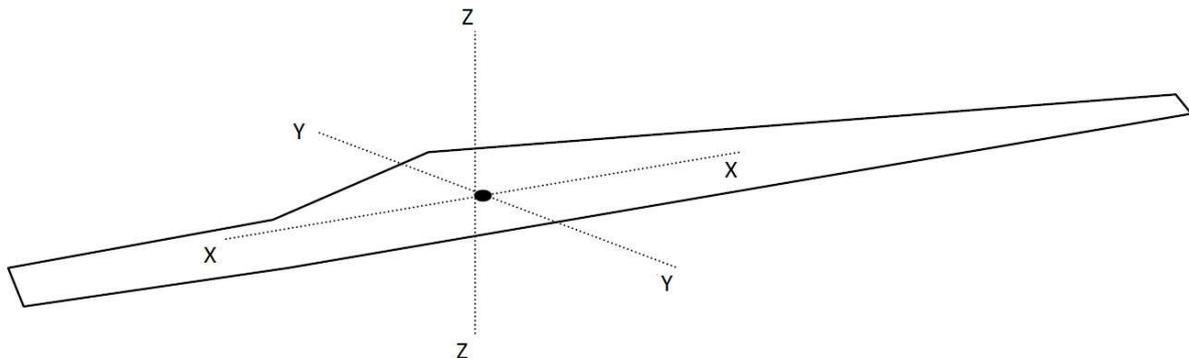


Fig. 12. Sistema di coordinate usato per la pala

Gli angoli dell'ala rispetto alla direzione di avanzamento, ovvero i coefficienti di resistenza e portanza, durante la parabola di caduta non sono peraltro univocamente determinati sulla base di quelli posseduti al momento del distacco ma variabili istante per istante: infatti le forze inerziali (per la conservazione della quantità di moto) determineranno la rotazione della pala o del frammento attorno ai tre assi principali di inerzia, così come ostacolata e modificata dalle spinte aerodinamiche connesse con la geometria dell'oggetto.

Il moto che ne deriva è di tipo rototraslatorio complesso e non è deterministicamente possibile prevederlo con completezza. Tuttavia, si possono formulare ipotesi semplificative, e tuttavia conservative, assumendo il caso puramente accademico che il corpo si disponga con la dimensione principale allineata all'orizzonte, posizione tale da offrire la minima resistenza con l'aria rispetto alla direzione di avanzamento orizzontale (*moto del profilo alare*) e massimo attrito rispetto a quelle verticali (*massima portanza*).

Tutte queste assunzioni risultano conservative ai fini della gittata massima; in questo modo la gittata reale non sarà superiore a quella calcolata, poiché nel caso reale il coefficiente di resistenza aerodinamica sarà continuamente maggiore di quello del caso del moto “a giavellotto”, per effetto dell’anzidetta rotazione della pala attorno ai propri assi d’inerzia.

Dell’incidenza delle forze aerodinamiche aggiuntive indotte dalla rototraslazione si terrà conto mediante un coefficiente correttivo analitico sperimentale.

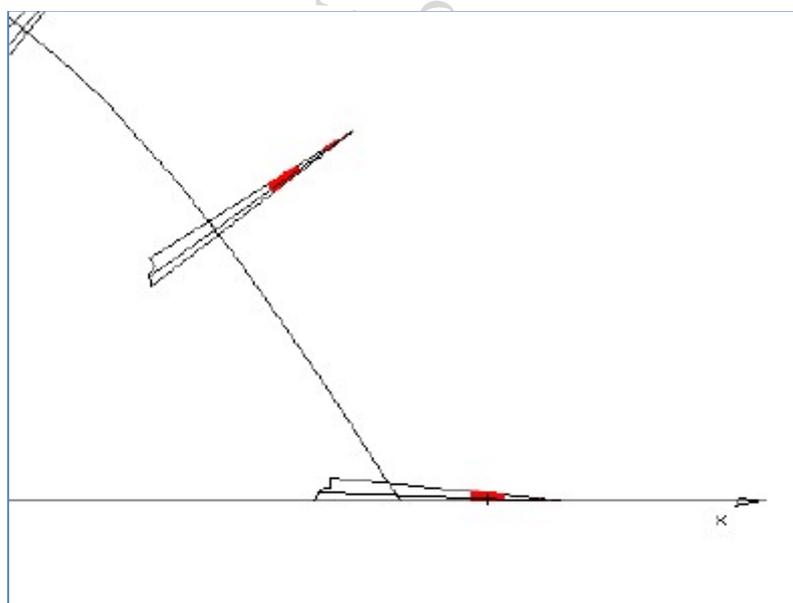


Fig. 13. Simulazione del comportamento della pala al momento del contatto con il terreno: alla posizione del centro di massa va sommata la lunghezza eccedente della pala.

Il calcolo descritto nel seguito determina il percorso del baricentro dell’elemento distaccato (pala intera o frammento di esso) e quindi la gittata di tale punto materiale; ai fini degli impatti sui recettori presenti nell’area si è poi determinata la gittata della punta della pala, sommando alla predetta gittata baricentrica la massima distanza del baricentro dal perimetro del proietto. In questa ipotesi conservativa si assume che l’elemento distaccato, durante tutto il volo, mantenga una posizione perpendicolare alla traiettoria del baricentro, come rappresentato in **Fig. 13**.

Tale modellazione è del tutto conservativa: innanzitutto nella realtà il proietto, almeno nel primo terzo della fase di volo, continuerà a ruotare attorno ai propri assi di inerzia, determinando un incremento dell’attrito ed una riduzione della gittata; inoltre nelle fasi terminali del volo esso si disporrà con la parte più pesante verso il basso, esponendo la massima sezione frontale resistente all’avanzamento; infine, a causa e per

effetto di tale disposizione, la punta del frammento, a distanza maggiore dal baricentro, atterrerà verso il punto di lancio.

Quanto appena descritto è supportato dal recente lavoro *“Wind turbine rotor fragments: impact probability and setback evaluation”*⁶.

Di seguito si riporta un grafico tratto da tale lavoro:

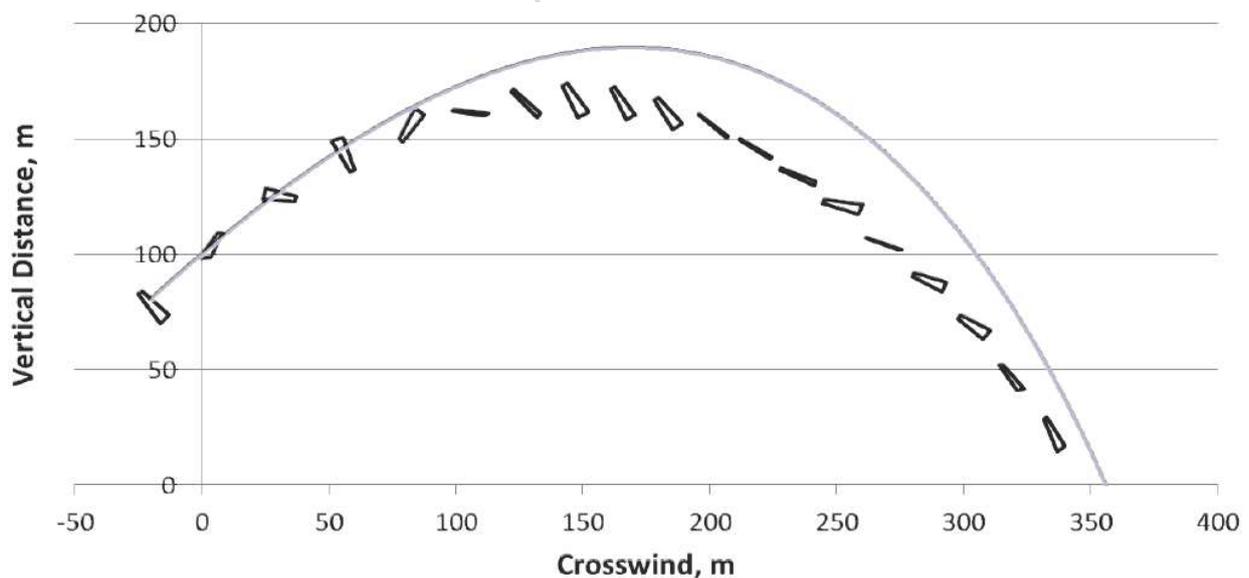


Fig. 14. Modellizzazione della traiettoria ed orientamento di un frammento da 10m per una torre da 1.5MW, rotore da 70m e hub da 80, con velocità angolare pari a 26.3rpm.

In Fig. 14, la linea continua rappresenta la traiettoria balistica in attrito aerodinamico. Come può desumersi, la rototraslazione introduce una riduzione del lancio a causa della vorticosità aerodinamica aggiuntiva.

Nel medesimo studio si afferma – e ciò è confermato dai risultati ottenuti in questa relazione- che lo stesso oggetto, in un lancio simulato nel vuoto, avrebbe una gittata pari circa al doppio della distanza ottenuta nella realtà.

Per studiare la gittata del proiettile utilizzeremo un **sistema di riferimento cartesiano xy** in cui l'origine **O** degli assi del sistema coincida con il centro della base della torre dell'aerogeneratore, avendo assunto l'asse delle **Y** positivo verso l'alto, e l'asse positivo delle **X** nello stesso verso del moto orizzontale del proiettile. Rispetto a questo sistema di riferimento il punto di lancio del baricentro del proiettile avrà coordinate (x_0, y_0) , che verranno ora determinate.

⁶ Scott M. Larwood, University of the Pacific, e C. P. Van Dam, University of California, Davis – 2015.

5.2 Modello di calcolo

Si osserva innanzitutto che le equazioni qui di seguito trattate si riferiscono all'emiciclo ascendente della pala, tra i 270° e i 90° , a sinistra rispetto alla torre considerata nella figura che segue; il caso discendente è irrilevante ai fini della gittata massima, poiché il lancio tra i 90° e i 270° è ad alzo negativo, e pertanto di gittata senz'altro inferiore rispetto all'arco di lancio nel semipiano opposto.

Come evidente dalla figura, si potrà assumere anche –se ne ricorre il caso- che l'aerogeneratore si trovi in una posizione sopraelevata rispetto al punto di caduta, in modo da ottenere una gittata calcolata il più possibile realistica; il dislivello H_i , altezza di installazione rispetto al punto di caduta, non può essere assunto a priori ma deve valutarsi in funzione della gittata. Pertanto, si calcolerà prima il valore della gittata rispetto al piano di installazione; sulla base del valore di gittata ottenuto in prima battuta si valuterà la H_i corrispondente procedendo ad un nuovo calcolo iterativo. In alternativa si può procedere per via grafica valutando l'intersezione della traiettoria calcolata con il profilo altimetrico più sfavorevole nel punto considerato.

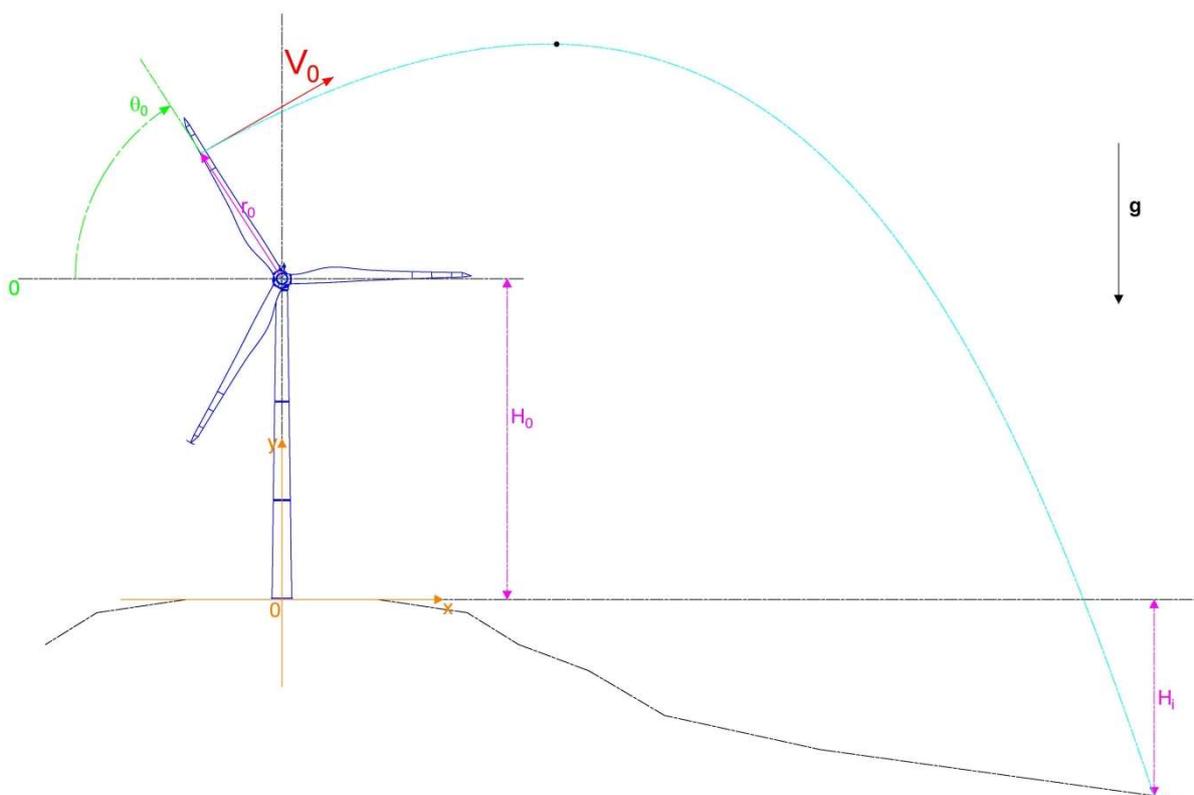


Fig. 15. Schema di massima del fenomeno oggetto di studio.



Le equazioni che reggono il moto del modello adottato sono quelle di un punto materiale soggetto alla forza di gravità, alla portanza lungo l'asse y ed alla resistenza dell'aria lungo l'asse x . Scrivendo l'equazione della dinamica in forma scalare nel piano di gittata si ottiene:

$$\ddot{x} = -k_x \dot{x}^2, \quad [1]$$

$$\ddot{y} = -g - k_y \dot{y}^2, \quad [2] \text{ per il tratto ascendente;}$$

$$\ddot{y} = -g + k_y \dot{y}^2, \quad [3] \text{ per il tratto discendente.}$$

dove $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, costante nel campo del moto considerato, è l'accelerazione di gravità, e k_x è un termine costante dato dalla seguente espressione:

$$k_x = \frac{1}{2} \rho \frac{S_x C_x}{m} [4]$$

con ρ densità dell'aria, S_x l'area della sezione del frammento misurata nel piano YZ , C_x il suo coefficiente di resistenza aerodinamica ed m la massa.

Per k_y vale l'analogo nell'asse ortogonale:

$$k_y = \frac{1}{2} \rho \frac{S_y C_y}{m} [5]$$

La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo α_0 di distacco, dalla distanza del centro di massa del frammento di pala dall'asse del mozzo r_0 e dalla velocità tangenziale V del frammento di pala al momento del distacco. Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$x_0 = -r_0 \cos \alpha_0$$

$$y_0 = H + r_0 \sin \alpha_0$$

$$v_x = V \sin \alpha_0$$

$$v_y = V \cos \alpha_0$$

dove H è l'altezza della torre (H_0) incrementata dell'eventuale dislivello (H_i) nel caso in cui l'aerogeneratore si trovi in una posizione sopraelevata rispetto agli elementi sensibili.

Integrando due volte l'equazione della dinamica lungo l'asse x [1], si ricava la legge oraria del moto:

$$x(t) = \frac{1}{k_x} \ln$$

Analizziamo ora il tratto ascendente del moto parabolico del proietto. Indicando con v la componente verticale della velocità, dalla [2] si ottiene:

$$\tan^{-1}\left(v\sqrt{\frac{k_y}{g}}\right) = \tan^{-1}\left(v_y\sqrt{\frac{k_y}{g}}\right) - \sqrt{gk_y}t \quad [7]$$

E quindi, con semplici passaggi trigonometrici, la relativa espressione della velocità:

$$v(t) = \frac{\sqrt{g}v_y - \sqrt{\frac{g}{k_y}}\tan(t\sqrt{gk_y})}{\sqrt{\frac{g}{k_y}} + v_y\tan(t\sqrt{gk_y})}, \quad [8]$$

Il punto di inversione del moto e quindi di massima altezza si ottiene al tempo T_{max} quando la componente verticale della velocità si annulla, ovvero, dalla [7]:

$$T_{max} = \frac{1}{\sqrt{gk_y}} \tan^{-1}\left(v_y\sqrt{\frac{k_y}{g}}\right) \quad [9]$$

La legge del moto lungo l'asse y può essere facilmente ricavata a partire ancora dalla [2] operando sull'identità differenziale della velocità:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dy} \frac{dy}{dt} \quad [10]$$

Sostituendo la [10] nella [2] si ottiene l'espressione della posizione in funzione della velocità istantanea:

$$y(v) = \frac{1}{2k_y} \ln\left(\frac{v_y^2 + \frac{g}{k_y}}{v^2 + \frac{g}{k_y}}\right), \quad [11]$$

L'altezza massima raggiunta dal proietto si ottiene imponendo $v = 0$ nella [11] ed aggiungendovi la quota di partenza y_0 :

$$Y_{max} = \frac{1}{2k_y} \ln\left(\frac{v_y^2 + \frac{g}{k_y}}{\frac{g}{k_y}}\right) + y_0, \quad [12]$$

A partire dal punto di massimo della traiettoria pseudoparabolica del proietto deve applicarsi la [3] per la fase di discesa; con le opportune integrazioni, si ottiene:

$$v(t) = \sqrt{\frac{g}{k_y}} \tanh\left(-t\sqrt{gk_y}\right), \quad [13]$$



Dove si è posto $t = t - T_{max}$, ricordando di aver suddiviso la traiettoria in fase ascendente e discendente; il segno della velocità negativo che ne deriva è connesso alla scelta dal sistema di riferimento orientato contro il campo gravitazionale.

Analizzando la [19] si desume che per $t \rightarrow \infty$ la velocità tende asintoticamente al parametro $\sqrt{\frac{g}{k_y}}$, che prende il nome di *velocità limite* v_L .

Dalla [13] è immediato ottenere la legge oraria per integrazione diretta; ricordando che la quota di partenza è Y_{max} si ottiene:

$$y(t) = Y_{max} - \frac{1}{k_y} \ln \left[\cosh \left(t \sqrt{gk_y} \right) \right], [14]$$

Dalla [14], si ricava infine il valore del tempo di discesa del frammento di pala, ottenuto per $y(t) = 0$:

$$T_d = \frac{1}{\sqrt{gk_y}} \cosh^{-1} [e^{Y_{max}k_y}] [15]$$

Siamo ora in grado di calcolare la gittata L del frammento di pala, ponendo nella legge del moto orizzontale [6] il valore del tempo di volo T_v , così ottenuto:

$$T_v = T_{max} + T_d [16]$$

Per i calcoli effettuati nei passaggi seguenti ci si è avvalsi di dati estrapolati dai datasheet e dai disegni forniti dal costruttore dell'aerogeneratore, dei quali qui si riassume i principali in forma tabellare:

		Full blade	10m	5m
Sx = massima sezione perpendicolare all'asse principale del proietto	Sx [m ²]	6,55	0,3	0,176
Sy = massima area proiettata lungo l'asse principale del proietto	Sy [m ²]	215,8	13,65	5,32
Sz = minima area proiettata lungo l'asse principale del proietto	Sz [m ²]	79,6	2,7	1,05
Centro di massa dal centro di rotazione	[m]	27,38	71,6	76
massa	[kg]	20000	385	126

Tab. 3. tabella di riepilogo dei dati della pala e suoi frammenti.

Per tutti i casi di studio, la velocità di lancio è stata assunta pari alla massima velocità angolare del rotore di 10 giri/min (ω_0) per la GE158, come sopra analizzato.



6. RISULTATI DEL CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER ROTTURA DELL'INTERA PALA

Di seguito si riportano alcuni dati essenziali per l'applicazione del metodo illustrato al paragrafo che precede. Il significato dei simboli e il loro valore sono riportati nella seguente **Tab. 4** relativamente all'aerogeneratore GE158.

Diametro del rotore [m]	D	158
Altezza del mozzo o Hub [m]	H _{hub}	101
Lunghezza pala [m]	L _{pala}	77,4
Diametro del mozzo [m]	d _{mozzo}	3.20
Velocità angolare massima Overspeed Protection [rpm]		25
Velocità vento di cut-out [m/s]		25
Peso pala [kg]		20.000
Inclinazione asse del rotore		6°

Tab. 4. Specifiche tecniche della GE1158.

Si è utilizzata la posizione del centro di massa rinveniente dalla **Tab. 3**.

Il calcolo della gittata massima è stato pertanto effettuato con il centro di massa della pala (r_0) distante **27,38** m dal mozzo.

Nella seguente tabella sono rappresentati i valori di ingresso da introdurre nella risoluzione delle equazioni del moto e i valori ottenuti per i coefficienti k_x , k_y . Si è introdotto un ulteriore coefficiente, k_z , per tener conto dei periodi in cui la faccia ortogonale all'asse z del sistema di riferimento principale adottato è esposta in direzione del moto a causa degli effetti di rototraslazione.

	ρ (kg/m ³)	1,225			
S_x (m ²)	6.55	S_y (m ²)	215.8	S_z (m ²)	79.6
C_x	0,35	C_y	0.8	C_z	0.65
$k_x = \frac{1}{2} \rho \frac{S_x C_x}{m}$	0,000064	$k_y = \frac{1}{2} \rho \frac{S_y C_y}{m}$	0,004856	$k_z = \frac{1}{2} \rho \frac{S_z C_z}{m}$	0,001455
	m (kg)	20000			

Tab. 5. Valori utilizzati per il calcolo

Il calcolo della gittata massima è stato poi effettuato implementando le equazioni descritte al paragrafo precedente su foglio excel (riportato in allegato alla presente relazione), calcolando il lancio in tutto il

semipiano ad alzo positivo, ovvero tra 270° e 90° . I coefficienti sono stati impiegati in forma di media attraverso un fattore correttivo funzione non lineare dei coefficienti medesimi, ottenuto per via sperimentale, che tiene conto del fatto che nel primo terzo del volo il corpo sarà soggetto a rototraslazione e che per circa $2/3$ della traiettoria il corpo opporrà le massime sezioni resistenti all'avanzamento, rendendo percentualmente trascurabile il contributo della sezione minima trasversa.

Qui di seguito il grafico che rappresenta la variazione della gittata in funzione dell'angolo di distacco⁷:

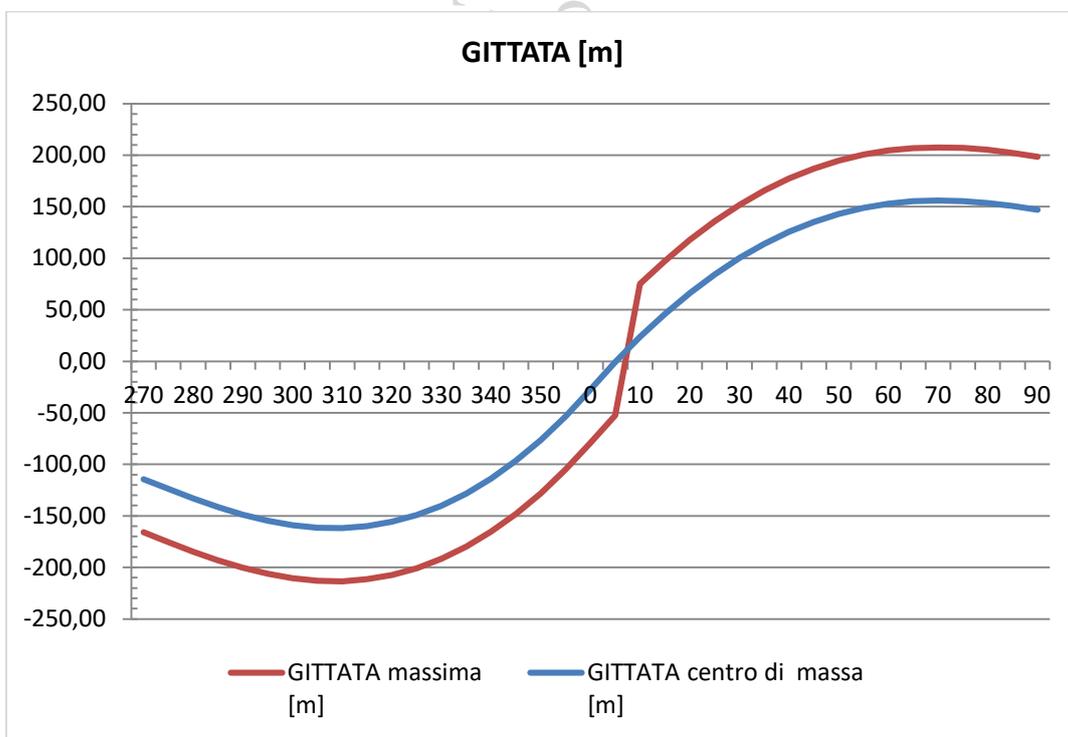


Fig. 16. Gittate al variare dell'angolo di distacco per la rottura dell'intera pala.

I principali risultati del calcolo, approssimati per eccesso, riferiti alla $Rpm_{max} = 10$ giri/min, sono qui riassunti:

Angolo di massima gittata	300°	Angolo di massima elevazione	25°
Tempo di volo [s]	9		
Gittata del centro di massa [m]	175		
Gittata massima [m]	225	Elevazione massima [m]	245

In riferimento alla $Rpm_{min} = 6,5$ giri/min la gittata massima è pari a 170m (vedere tabelle di calcolo allegate).

Il calcolo è stato condotto considerando un dislivello tra punto di installazione dell'aerogeneratore e punto di caduta dell'elemento rotto di 100m.

⁷ Per il sistema di riferimento adottato si rimanda alla Fig. 154

7. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER DISTACCO DEI FRAMMENTI DI PALA

Per il calcolo della gittata massima per rottura di un frammento di pala sono stati presi in considerazione le due seguenti casistiche:

- Rottura di un frammento di pala a distanza di 10 m dalla punta della pala;
- Rottura di un frammento di pala a distanza di 5 m dalla punta della pala;

7.1 Rottura di un frammento di pala distante 10 m dalla punta della pala

Nella seguente tabella sono rappresentati i valori di ingresso da introdurre nella risoluzione delle equazioni del moto, come nel caso dell'intera pala:

	ρ (kg/m ³)	1,225			
S_x (m ²)	0.3	S_y (m ²)	13.65	S_z (m ²)	2.7
C_x	0,45	C_y	0.6	C_z	0.4
$k_x = \frac{1}{2}\rho \frac{S_x C_x}{m}$	0,000215	$k_y = \frac{1}{2}\rho \frac{S_y C_y}{m}$	0,013030	$k_z = \frac{1}{2}\rho \frac{S_z C_z}{m}$	0,001718
	m (kg)	385			

Tab. 6. Valori utilizzati per il calcolo

Si è utilizzata la posizione del centro di massa rinveniente dalla **Tab. 3**.

Il calcolo della gittata massima è stato pertanto effettuato con il centro di massa del frammento situato a 71.6 m dal mozzo.

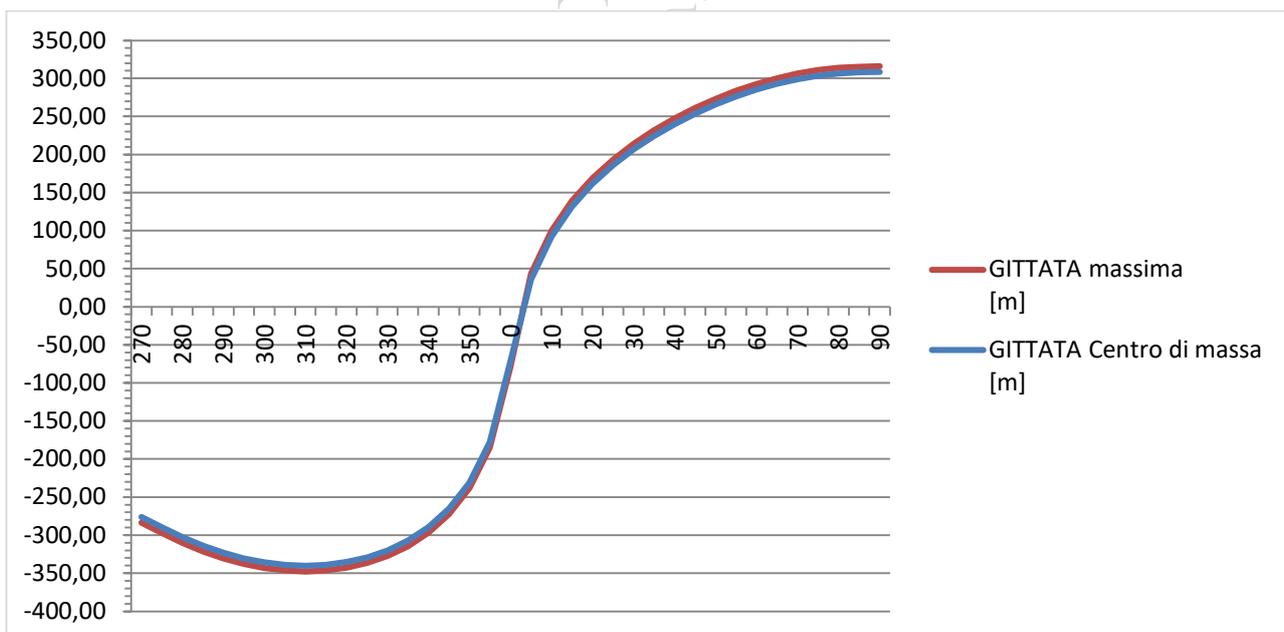


Fig. 17. Gittate al variare dell'angolo di distacco per la rottura del frammento da 10m

I principali risultati del calcolo, approssimati per eccesso, riferiti alla **Rpm_{max} = 10 giri/min**, sono qui riassunti:

Angolo di massima gittata	315°	Angolo di massima elevazione	35°
Tempo di volo [s]	13		
Gittata del centro di massa [m]	275		
Gittata massima [m]	285	Elevazione massima [m]	330

In riferimento alla **Rpm_{min} = 6,5 giri/min** la gittata massima è pari a 230m (vedere tabelle di calcolo allegate). Il calcolo è stato condotto considerando un dislivello tra punto di installazione dell'aerogeneratore e punto di caduta dell'elemento rotto di 100m.

7.2 Rottura di un frammento di pala distante 5 m dalla punta della pala

Nella seguente tabella sono rappresentati i valori di ingresso da introdurre nella risoluzione delle equazioni del moto, come nei casi precedenti:

	ρ (kg/m ³)	1,225			
S_x (m ²)	0.176	S_y (m ²)	5.32	S_z (m ²)	1.05
C_x	0,35	C_y	0.6	C_z	0.4
$k_x = \frac{1}{2} \rho \frac{S_x C_x}{m}$	0,000299	$k_y = \frac{1}{2} \rho \frac{S_y C_y}{m}$	0,015517	$k_z = \frac{1}{2} \rho \frac{S_z C_z}{m}$	0,002042
	m (kg)	126			

Tab. 7. Valori utilizzati per il calcolo

Si è utilizzata la posizione del centro di massa rinveniente dalla **Tab. 3**.

Il calcolo della gittata massima è stato pertanto effettuato con il centro di massa del frammento situato a 76 m dal centro del mozzo.

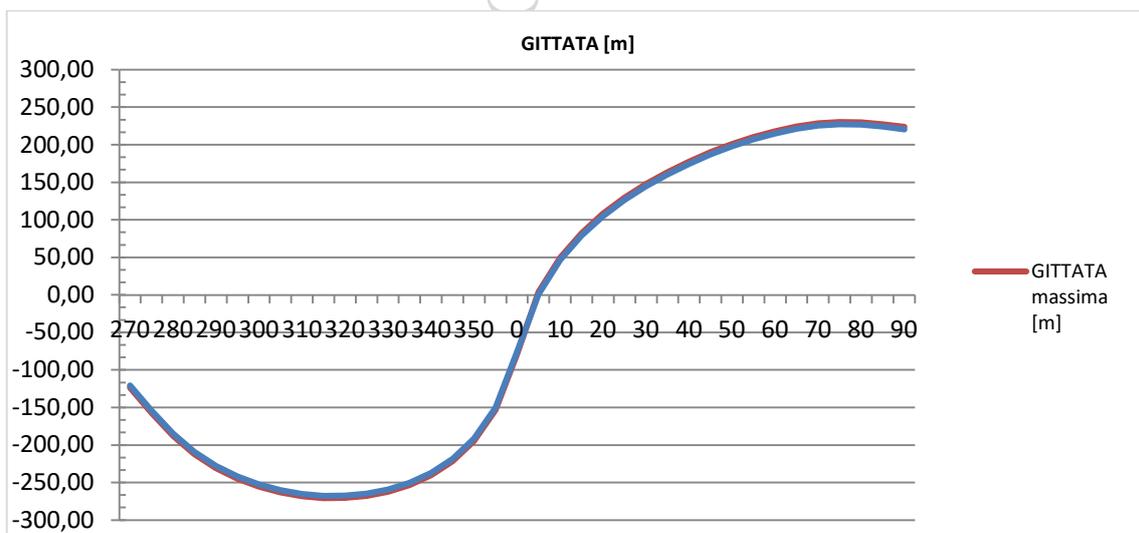


Fig. 18. Gittate al variare dell'angolo di distacco per la rottura del frammento da 5m

I principali risultati del calcolo, approssimati per eccesso, riferiti alla **Rpm_{max} = 10 giri/min**, sono qui riassunti:



Angolo di massima gittata	315°	Angolo di massima elevazione	35°
Tempo di volo [s]	12		
Gittata del centro di massa [m]	270		
Gittata massima [m]	275	Elevazione massima [m]	335

In riferimento alla **Rpm_{min} = 6,5 giri/min** la gittata massima è pari a 225m (vedere tabelle di calcolo allegate).

Il calcolo è stato condotto considerando un dislivello tra punto di installazione dell'aerogeneratore e punto di caduta dell'elemento rotto di 100m.

8. RIEPILOGO DEI RISULTATI OTTENUTI

Nella tabella riepilogativa seguente si mostrano i risultati ottenuti nei tre casi di studio: rottura dell'intera pala, rottura di un frammento di pala distante 10 m dalla punta della pala e rottura di un frammento di pala distante 5 m dalla punta della pala, così come sopra calcolati

CASI DI STUDIO	Gittata con velocità di rotazione di 10 giri/min	Gittata con velocità di rotazione di 6,5 giri/min
<i>Rottura dell'intera pala</i>	225 m	170 m
<i>Rottura di un frammento distante 10 m dalla punta della pala</i>	285 m	230 m
<i>Rottura di un frammento distante 5 m dalla punta della pala</i>	275 m	225 m

Tab. 8. Riepilogo delle simulazioni effettuate

Il massimo valore di gittata calcolato tra tutti i casi considerati è pari a **285,00 m** e **230 m**, per il frammento di 10m, rispettivamente per le velocità di rotazione del rotore di 10 e 6,5 giri/min.

Tali valori devono essere confrontati con le distanze dei ricettori individuati.



8.1 Distanze dai principali elementi sensibili dell'area

Si riportano qui di seguito le **distanze minime** dai principali elementi urbanistici e infrastrutturali presenti nell'area di ubicazione del parco eolico.

Elementi sensibili	Distanze minime
Centro abitato di Alberona	1400 m
Centro abitato di Volturino	1800 m
Centro abitato di Volturara Appula	6700 m
Centro abitato di San Bartolomeo in Galdo	6400 m
Centro abitato di Roseto Valfortore	2100m
Centro abitato di Biccari	6200 m
S.P. 135	180 m

Tab. 9. Elenco elementi urbanistici e infrastrutturali sensibili nell'area del parco eolico. In giallo, è stato evidenziato l'unico elemento situato ad una distanza critica inferiore alla massima gittata della macchina: la Strada Provinciale "SP135". Tale distanza interessa gli aerogeneratori ALB02, ALB05, ALB10

Oltre ai suddetti elementi, nell'area del parco eolico sono presenti altri recettori significativi potenzialmente interessati dagli impatti attesi dalla realizzazione del parco eolico. I ricettori sono elencati nella **Tab. 10** nella quale sono riportate anche le distanze di ciascuno di essi da ciascuno dei 10 aerogeneratori del parco eolico in progetto.

Si precisa che i ricettori e la loro denominazione sono i medesimi analizzati anche nello Studio dell'Ombra giornaliera e nello studio acustico.

Dalla lettura della **Tab. 10** si desume che la distanza inferiore alla gittata massima di 285m si registra per seguenti recettori:

Recettore R7 distante 269m dall'aerogeneratore ALB2

Recettore R8 distante 261m dall'aerogeneratore ALB2

Recettore R19 distante 159m dall'aerogeneratore ALB4

In riferimento alla minima velocità di rotazione dell'aerogeneratore, pari a 6,5 giri/min, per la quale la gittata massima è di 230m, la situazione è invece la seguente:

Recettore R19 distante 159m dall'aerogeneratore ALB4

Da rilevare che i recettori R7, R8, R19 sono catastalmente classificati come Fabbricato diruto / F2: le **unità collabenti, categoria catastale f2, sono quelle costruzioni caratterizzate da un notevole livello di degrado** che ne determina una incapacità reddituale temporalmente rilevante. Ovvero unità immobiliari fatiscenti, ruderi, unità immobiliari demolite parzialmente, con il tetto crollato, fabbricati diruti.



Pertanto, essendo tali per questi recettori individuati non esiste allo stato un rischio sicurezza rispetto alla rottura accidentale di elementi rotanti in caso di guasto di aerogeneratori.

Pur tuttavia, anche qualora tali fabbricati dovessero volgere in una situazione di non obsolescenza e quindi, ristrutturati, di utilizzo per attività antropiche, al fine di rendere compatibili gli aerogeneratori con tali recettori rispetto alle condizioni di sicurezza riferite alla gittata degli elementi rotanti in caso di guasto, si potrà comunque procedere impostando le loro modalità operative in modo da essere parzializzati in termini di velocità di rotazione del rotore, o proprio fermati quando il piano di rotazione si trova allineato verso il recettore critico.

Per consentire un adeguato margine di sicurezza, la parzializzazione / fermo dell'aerogeneratore sarà effettuata quando il piano di rotazione si trova all'interno del cono di lancio avente bisettrice allineato con il recettore e generatrici ruotate di un angolo +/- gradi rispetto alla bisettrice stessa. In altri termini si tratterà di limitare la velocità del rotore al minimo di 6,5 giri/min per i recettori R7 ed R8; mentre per il recettore R19, in tale cono, la macchina dovrà essere fermata. Il tutto come dettagliatamente rappresentato nelle seguenti **Fig. 19**.

STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA
Ing. Mezzina Antonio
San Severo



STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA
 MEZZINA dott. ing. Antonio
 Via T. Solis, 128 - 71016 San Severo (FG)
 P. IVA 02037220718
 ☎ 0882-228072 / 📠 0882-243651
 ✉ info@studiomezzina.net



INDIVIDUAZIONE RECCETTORI							Distanze Torri											
COD.	COMUNE	CATEGORIA	E2	N2	F.	P.LLA		ALBE2	ALBE4	ALBE5	ALBE6	ALBE7	ALBE8	ALBE9	ALBE10	ALBE11	ALBE12	
R1	VOLTURINO	FABB DIRUTO	510038	4590402	28	197	R1											
R2	VOLTURINO	FABB DIRUTO	510593	4589648	29	151	R2	847										
R3	VOLTURINO	A4-D10	510525	4590033	31	478	R3	1073										
R4	ALBERONA	FABB DIRUTO	510599	4588240	9	350	R4	1123										
R5	ALBERONA	FABB DIRUTO	510374	4588182	9	100-101	R5	1063										
R6	ALBERONA	C2	509844	4588203	9	558	R6	931										
R7	ALBERONA	FABB DIRUTO	510006	4588879	8	140	R7	269										
R8	ALBERONA	FABB DIRUTO	509995	4588879	8	54	R8	261										
R9	ALBERONA	FABB DIRUTO	510319	4589084	8	50	R9	386										
R10	ALBERONA	FABB DIRUTO	510601	4588731	8	88	R10	791										
R11	ALBERONA	FABB DIRUTO	510018	4587417	19	9	R11											
R12	ALBERONA	FABB DIRUTO	510011	4587417	19	8	R12											
R13	ALBERONA	D6	510413	4586211	18	437	R13											
R14	ALBERONA	C1	509931	4586631	20	277	R14			1092	1126							
R15	ALBERONA	A3	509993	4586626	20	17	R15			1147	1162							
R16	ALBERONA	F2	509669	4587177	21	306	R16		982	1114								
R17	ALBERONA	A4-C2	509654	4587406	21	308	R17		1022									
R18	ALBERONA	C6	509669	4587441	21	309	R18		1039									
R19	ALBERONA	F2	508843	4587127	21	310	R19		159	688								
R20	ALBERONA	F2	509514	4587128	21	307	R20		825	956								
R21	ALBERONA	F2	509517	4587120	21	305	R21		828	955								
R22	ALBERONA	FABB DIRUTO	509429	4586685	23	2	R22		822	624	896							
R23	ALBERONA	D10	509884	4586285	23	437	R23			1024	865	1194						
R24	ALBERONA	A6-D10	509917	4586281	23	416	R24			1045	893							
R25	ALBERONA	FABB DIRUTO	509892	4586521	23	86	R25			1047	1021							
R26	ALBERONA	A3-C1-C2	509964	4586619	23	88	R26											
R27	ALBERONA	F2	510169	4586300	23	443	R27				1132							
R28	ALBERONA	F2	510134	4586297	23	444	R28				1103							
R29	ALBERONA	E3	510328	4586208	23	414	R29											
R30	ALBERONA	C1	510341	4586187	23	446	R30											
R31	ALBERONA	FABB DIRUTO	510303	4586154	23	293	R31											
R32	ALBERONA	CIMITERO	510838	4585635	24	A	R32											
R33	ALBERONA	D01	510808	4585485	29	188	R33											

STUDIO

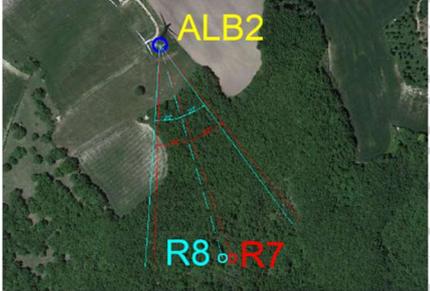
 <p>Immagine di ALB02 con i recettori R7 ed R8</p>	<p>Nel caso in cui i recettori R7 e/o R8 dovessero riqualificarsi, quando il piano di rotazione dell'aerogeneratore ALB02 si trova all'interno dei due coni rappresentati, la velocità di rotazione del rotore dovrà essere limitata a 6,5 giri/min.</p>
 <p>Immagine di ALB04 con il recettore R19</p>	<p>Nel caso in cui il recettore R19 dovesse riqualificarsi, quando il piano di rotazione dell'aerogeneratore ALB04 si trova all'interno del cono rappresentato, la macchina dovrà essere fermata.</p>

Fig. 19. Inquadramento aerogeneratore – recettore, cono di lancio e modalità operative da attuare.

Tenendo conto di tutte queste valutazioni, in definitiva l'unico recettore sensibile situato all'interno del possibile cono di lancio è la Strada Provinciale "SP135", oltre, ovviamente, a quelle vicinali e/o di servizio del parco eolico.

Tuttavia, alla luce delle considerazioni probabilistiche riportate nella parte iniziale della presente relazione, in ordine alla probabilità di accadimento dell'evento accidentale di rottura della pala, e del fattore di contemporaneità relativo alla presenza, nelle medesime circostanze di tempo e di luogo, di esseri umani in transito sui recettori anzidetti, **si ritiene che sussistano condizioni di sicurezza adeguate rispetto a tutti gli aerogeneratori, del tutto comparabili alla presenza occasionale di esseri umani in qualsiasi punto del terreno circostante agli stessi aerogeneratori, come agricoltori che vi lavorino da presso.** Peraltro, è da considerare che tutti gli aerogeneratori sono stati ubicati in aree considerate idonee per legge per effetto della esistenza nella medesima area di un impianto eolico oggetto di dismissione per il rifacimento; ciò ai sensi dell'art. 20 comma 8 p.to 1 del D.Lgs. 199/21.



9. CONCLUSIONI.

Non sono presenti nelle vicinanze degli aerogeneratori, ed in particolare entro la distanza di 285m, pari alla gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura, insediamenti abitativi e lavorativi a carattere continuativo, tali da poter essere interessati dagli elementi lanciati in caso di rottura; ciò ad eccezione dei recettori R7, R8, R19 che tuttavia sono fabbricati rurali collabenti. Quant'anche questi edifici dovessero in un futuro essere ristrutturati per consentire attività antropiche, è comunque possibile rendere compatibili gli aerogeneratori interessati, ALB02 e ALB04, effettuando una parzializzazione delle loro modalità operative, o addirittura fermando la macchina, nel cono di proiezione orientato verso i relativi recettori, in modo da limitare la gittata massima per i recettori R7 ed R8 e azzerarla per l'R19.

Gli unici elementi sensibili, pertanto, restano le strade situate nei dintorni degli aerogeneratori. Tuttavia, l'accadimento di fenomeni quali colpi di fulmine o urti accidentali che possono determinare l'eventuale distacco della pala o suoi frammenti determina un valore di rischio molto basso, reso ancora più basso dal fattore di contemporaneità.

Come descritto in narrativa, la probabilità di impatto tra un frammento di pala ed un oggetto situato tra 200 ed i 500m (come nel caso delle strade ricadenti nella zona di possibile impatto) è compresa tra 1×10^{-5} e 1×10^{-6} eventi per anno, rientrando nella classificazione di evento estremamente remoto, collegato ad un rischio associato classificabile - mediante matrice di rischio- "minimo". A solo titolo di paragone, la possibilità di un edificio di essere colpito da un fulmine è collocabile tra $\{1 \times 10^{-3}$ e $1 \times 10^{-4}\}$ ⁸, pertanto di almeno un ordine di grandezza superiore.

In conclusione, pur essendo la rottura accidentale di una pala o di parte di essa un evento altamente improbabile, la gittata massima dell'elemento rotante, nel caso in cui pur tuttavia tale fenomeno dovesse accadere, risulta essere inferiore alla distanza degli aerogeneratori dagli elementi sensibili più vicini presenti nell'area.

Si allegano i fogli di calcolo excel che hanno determinato il calcolo della gittata massima dell'intera pala o frammenti di essa al variare dell'angolo di distacco, sia per la velocità operativa del rotore di 10 giri/min che per quella ridotta di 6,5 giri/min.

San Severo, Febbraio 2024

STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA

Ing. MEZZINA Antonio



⁸ Cfr *Determining the Probability of Lightning Striking a Facility*, R.T. Hasbrouck, PE, National Lightning Safety Institute, 2004 - http://lightningsafety.com/nlsi_lhm/prbshort.html