

**Comuni di : SAN GIORGIO LA MOLARA, MOLINARA,
SAN MARCO DEI CAVOTI, BASELICE E FOIANO DI VAL FORTORE**

Provincia di : BENEVENTO

Regione : CAMPANIA

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

Infes



OPERA

**PROGETTO PER IL RIFACIMENTO E POTENZIAMENTO
DI UN PARCO EOLICO**

OGGETTO

TITOLO ELABORATO :

Relazione di calcolo della gittata massima di elementi rotanti per rottura
accidentale della pala e suoi frammenti

DATA : Dicembre 2021

N°/CODICE ELABORATO :

R 04.3

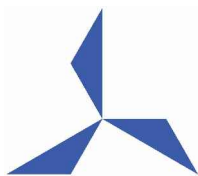
SCALA :

Folder :

Tipologia : Relazione

Lingua : ITALIANO

I TECNICI



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



00	Dicembre 2021	Emissione per progetto definitivo	Ing. Merlino	Ing. MEZZINA	IVPC
N° REVISIONE	DATA	OGGETTO DELLA REVISIONE	ELABORAZIONE	VERIFICA	APPROVAZIONE



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

IVPC



PROGETTO DEFINITIVO PER IL RIFACIMENTO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 146,40MW E POTENZA AI FINI DELLA CONNESSIONE PARI A 150 MW SITO NEI COMUNI DI BASELICE, FOIANO DI VAL FORTORE, SAN MARCO DEI CAVOTI, MOLINARA E SAN GIORGIO LA MOLARA (BN), NONCHÉ DELLE OPERE CONNESSE E DELLE INFRASTRUTTURE INDISPENSABILI ALLA COSTRUZIONE E ALL'ESERCIZIO DELL'IMPIANTO.

RELAZIONE TECNICA SPECIALISTICA

**Relazione di calcolo della gittata massima di elementi rotanti per rottura
accidentale della pala e suoi frammenti**

Codice Pratica TERNA n. 202001639



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.....	8
4. CARATTERISTICHE DELL'AEROGENERATORE.....	12
5. METODO UTIIZZATO PER IL CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA.....	14
5.1 Ipotesi.....	14
5.2 Modello di calcolo.....	18
6. RISULTATI DEL CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER ROTTURA DELL'INTERA PALA.....	22
7. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER DISTACCO DEI FRAMMENTI DI PALA.....	24
7.1 Rottura di un frammento di pala distante 10 m dalla punta della pala.....	24
7.2 Rottura di un frammento di pala distante 5 m dalla punta della pala.....	25
8. RIEPILOGO DEI RISULTATI OTTENUTI.....	26
8.1 Distanze dai principali elementi sensibili dell'area.....	27
9. CONCLUSIONI.....	30

STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA
 Ing. Mezzina Antonio
 San Severo

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 Baselice, Foiano di Val Fortore, San Marco dei Cavoti, Molinara e San Giorgio la Molarata, tutti in provincia di Benevento.

L’impianto, nella configurazione finale, sarà composto da n. 24 aerogeneratori, ciascuno della potenza di 6,1MW, con diametro del rotore di 158m, altezza di mozzo 101m e altezza complessiva (TIP) di 180m.

L’impianto eolico nella sua configurazione finale, sarà in definitiva costituito da 3 Aerogeneratori situati nel territorio di Baselice, 1 aerogeneratore in agro di Foiano di Valfortore, 6 aerogeneratori in agro di San Marco dei Cavoti, 8 aerogeneratori in agro di Molinara, 6 aerogeneratori in agro di San Giorgio La Molarata.

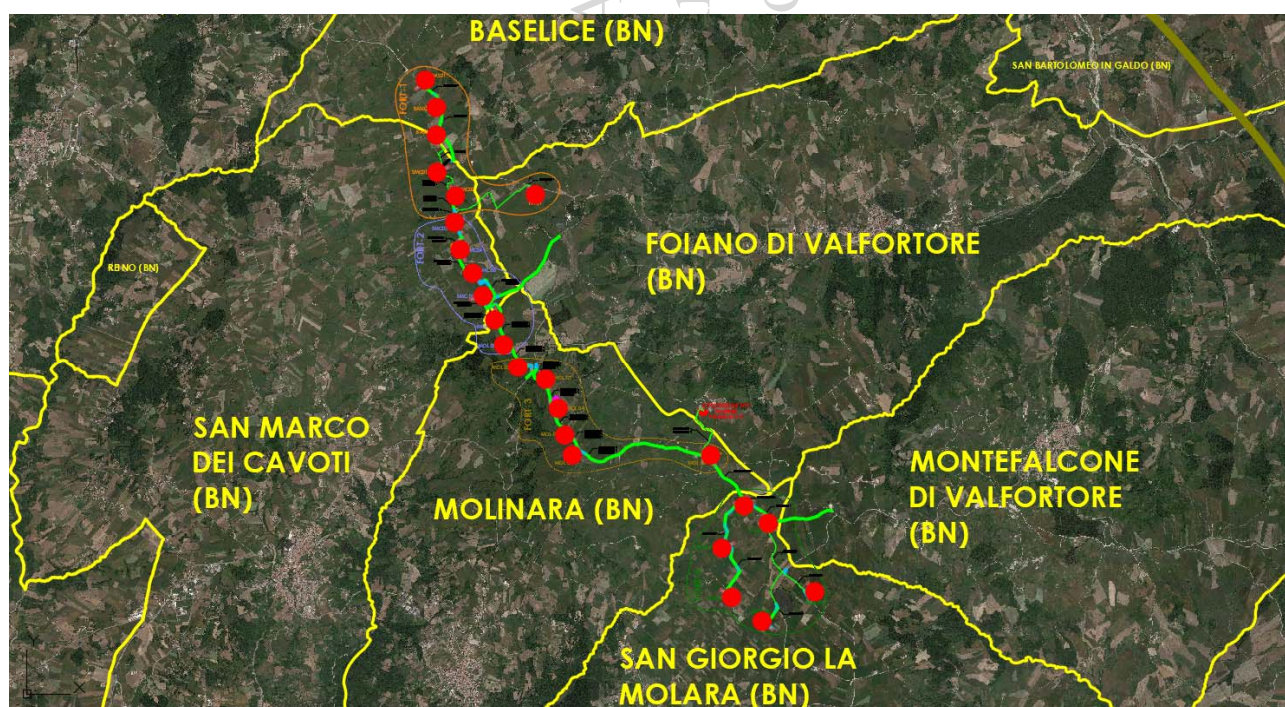


Fig. 1. Inquadramento planimetrico del parco eolico su ortofoto.

A seguito di tutti gli studi effettuati sull’area in esame (analisi orografiche, anemologiche e della rete elettrica) e in base all’ipotesi di rendimento economico, si ritiene che per l’impianto in oggetto possano essere convenientemente 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 annunciata (poiché la curva di potenza, $P = f(v_{\text{vento}})$, è certificata).



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



La turbina utilizzata per lo studio progettuale è caratterizzata da una potenza nominale unitaria pari a 6,1 MW, ed un'altezza massima della punta pala di 180 mt.

Il modello di turbina scelto è il più performante sul mercato per il sito eolico in esame, tuttavia IVPC si riserva nel futuro di avere la possibilità di optare su altri modelli con caratteristiche simili.

Un eventuale cambiamento sarà fatto solo se ritenuto in grado di migliorare le valutazioni fatte ad oggi.

Al solo fine di caratterizzare lo studio della gittata è stata presa in considerazione una Generale Electric GE158 che ha le medesime caratteristiche dimensionali dell'aerogeneratore di progetto, avente un'altezza al mozzo pari a 101 metri ed un diametro del rotore pari a 158 metri.

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.

STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA
Ing. Mezzina Antonio
San Severo

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 in modo esaustivo, tenendo pertanto in considerazione le forze di attrito viscoso ed utilizzando l'analisi dinamica per risolvere il problema fluidodinamico.

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 di settore, facendo riferimento a tre eventi esemplificativi:

1. Rottura della pala intera;
2. Rottura del frammento di pala distante 10 m dalla punta della pala;
3. Rottura del frammento di pala distante 5 m dalla punta della pala.

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, ed in effetti statisticamente più riscontrato.

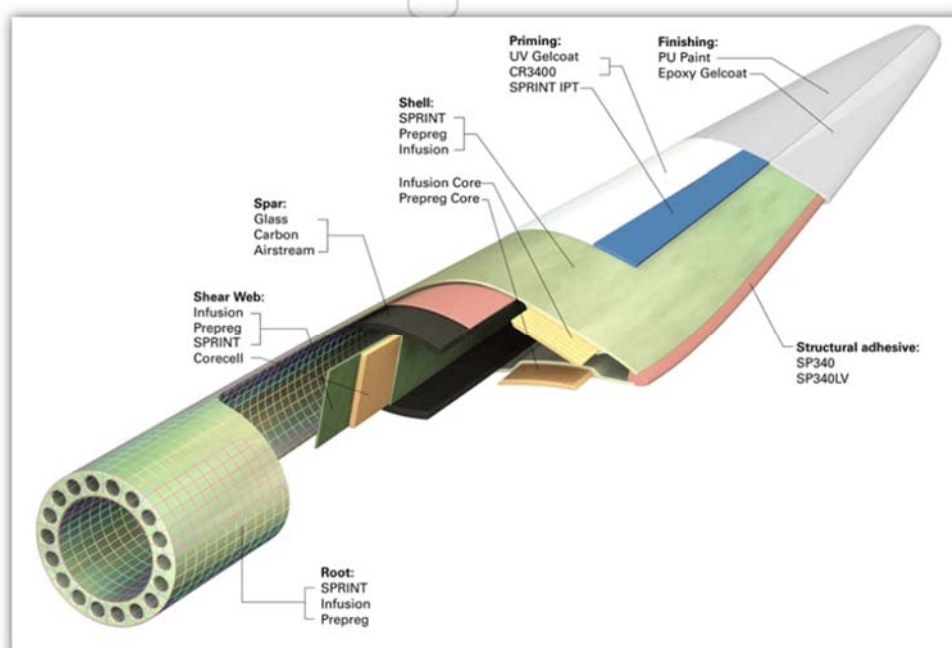


Fig. 2. Pala in composito di un aerogeneratore

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:

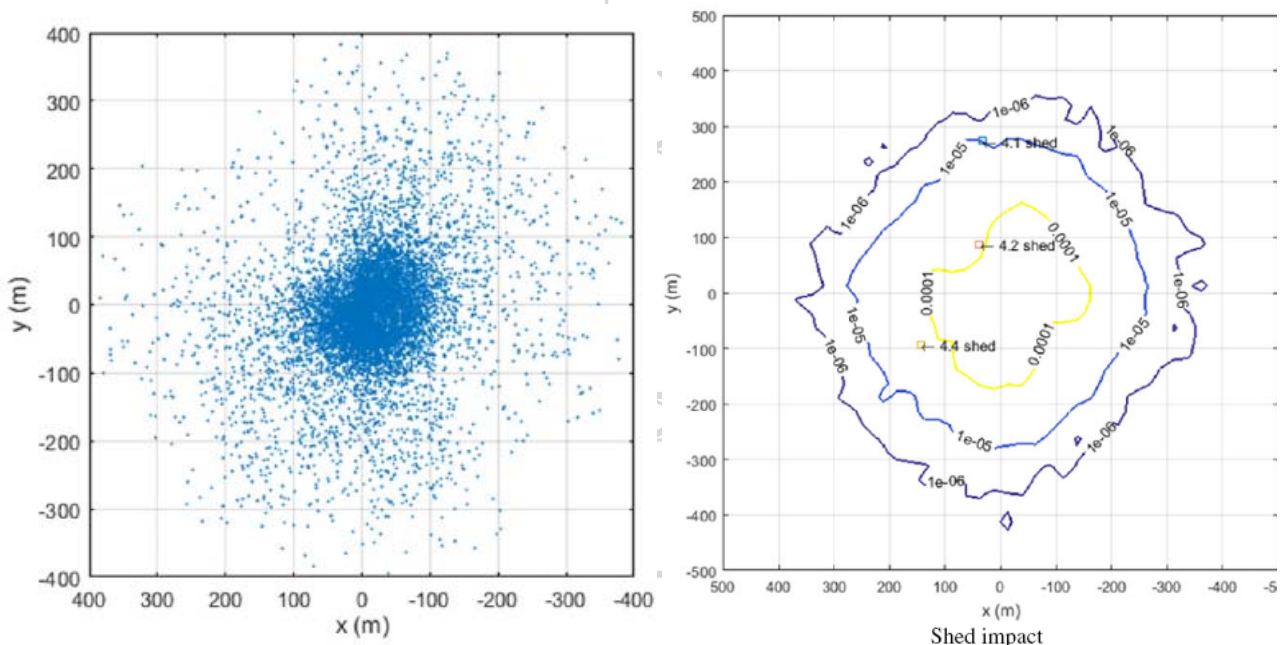


Fig. 3. A sx: Distribuzione dei punti di impatto su 10.000 simulazioni per una turbina test. A dx: relative probabilità di impatto rispetto ad una costruzione di pianta 25x25 ed altezza 3.67m².

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

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 $5,4 \times 10^{-6}$.

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.

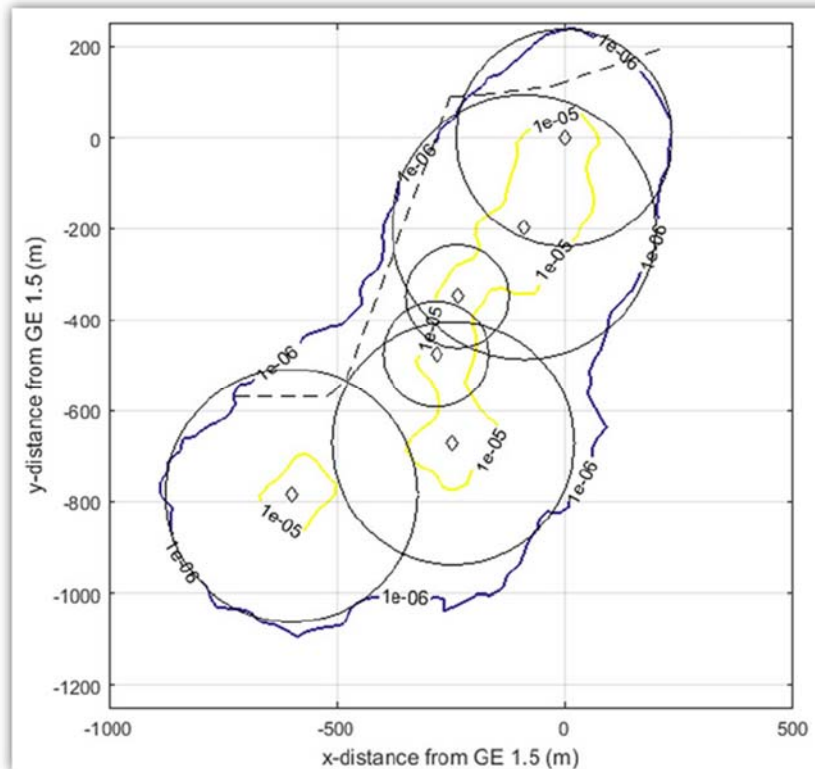


Fig. 4. Involuppo delle probabilità di impatto per un parco costituito da macchine di varia taglia (rotori da 35 a 106m) ⁴

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	
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

3. INQUADRAMENTO DELL'IMPIANTO.

L'impianto eolico sarà composto da n° 24 aerogeneratori, tutti localizzati in provincia di Benevento, tra i comuni di Baselice, Foiano di Val Fortore, San Marco dei Cavoti, Molinara e San Giorgio la Molar.

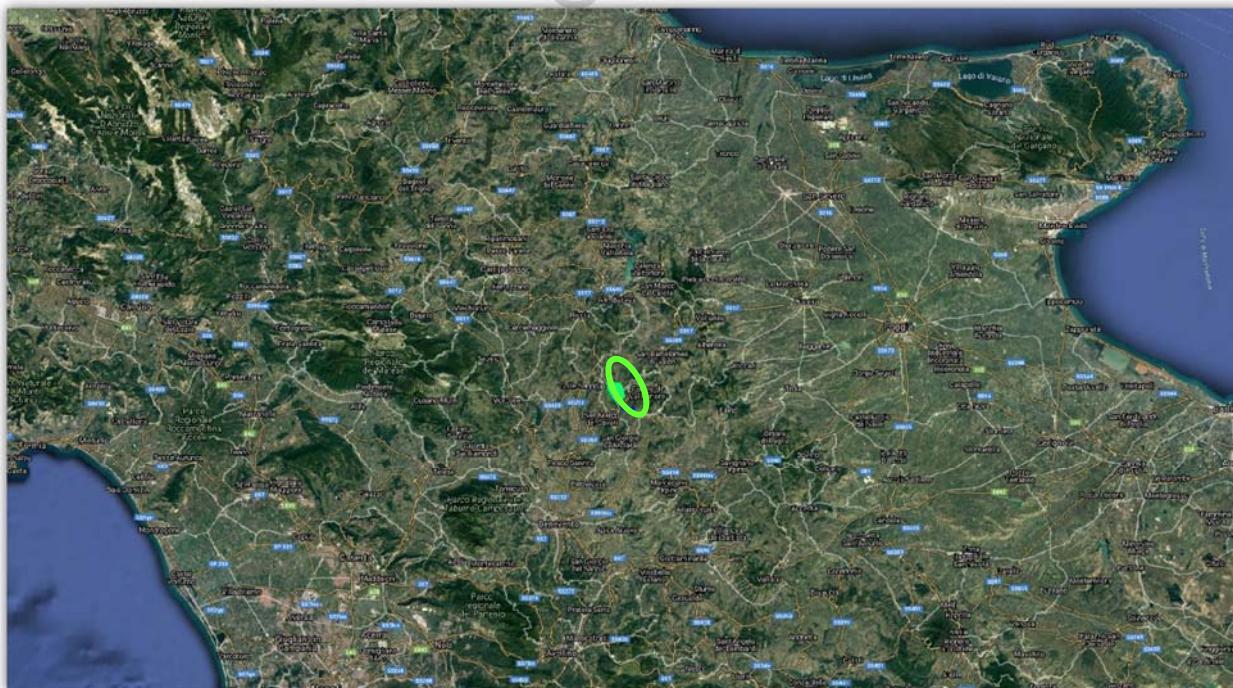


Fig. 5. Inquadramento di ampio raggio su ortofoto dell'area di intervento (punto verde), situata nel cuore dell'Appennino.



Fig. 6. Inquadramento su ortofoto del parco, situato tra i comuni di Baselice, San Marco dei Cavoti, Foiano di Valfortore, Molinara, San Giorgio la Molar; in rosso, gli aerogeneratori; in verde 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.

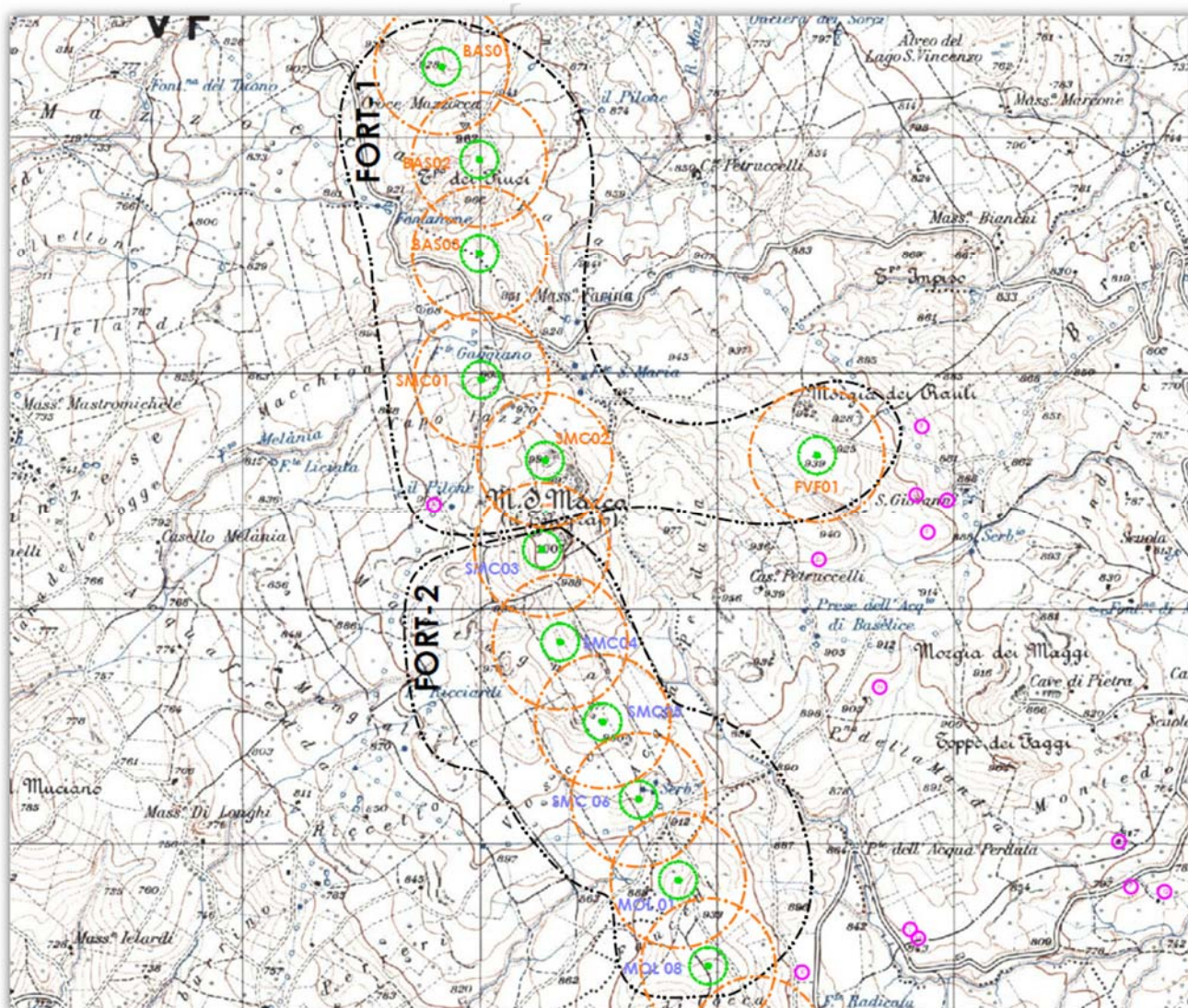


Fig. 7. Inquadramento geografico dei due sottoimpianti "Fortore 1 e Fortore 2" del parco eolico "FORTOR" su IGM: in verde l'area spazzata dagli aerogeneratori; in arancio la circonferenza di massima gittata (280m, calcolata come verrà ampiamente descritto in appresso); in magenta i ricettori sensibili individuati.

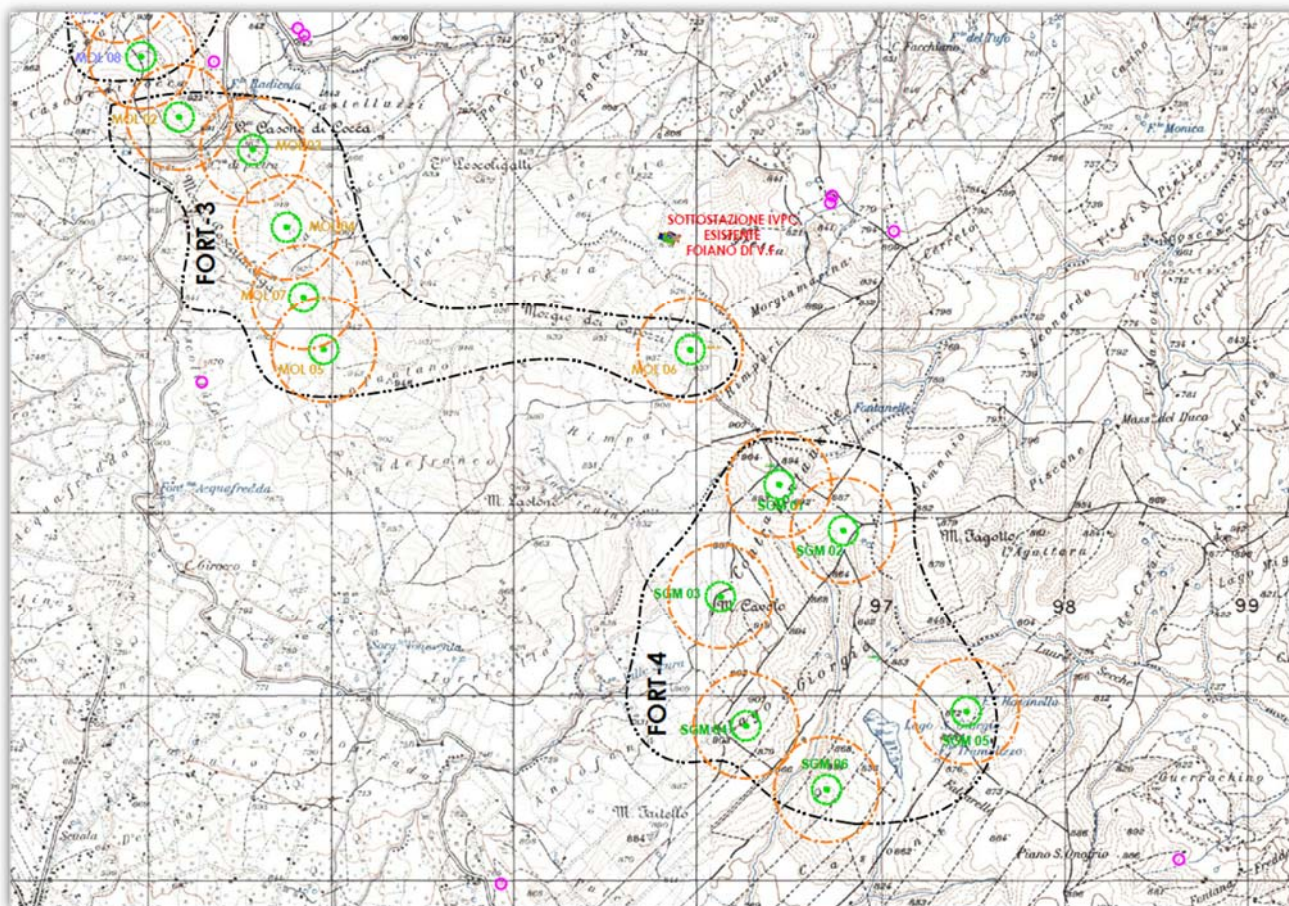


Fig. 8. Inquadramento geografico dei due sottoimpianti "Fortore 3 e Fortore 4" del parco eolico su IGM: in verde l'area spazzata dagli aerogeneratori; in arancio la circonferenza di massima gittata; in magenta i ricettori sensibili.

Coordinate WTG

Sottoimpianto	Denominazione	Comune	UTM - EST [m]	UTM - NORD [m]	altitudine [m s.l.m.]
FORTORE_1	BAS01	Baselice	491 766	4 580 110	926
	BAS02	Baselice	491 926	4 579 718	951
	BAS03	Baselice	491 927	4 579 318	940
	SMC01	San Marco dei Cavoti	491 934	4 578 782	925
	SMC02	San Marco dei Cavoti	492 203	4 578 440	984
	FVF01	Foiano di Val Fortore	493 355	4 578 462	936
FORTORE_2	SMC03	San Marco dei Cavoti	492 190	4 578 060	1.000
	SMC04	San Marco dei Cavoti	492 268	4 577 667	986
	SMC05	San Marco dei Cavoti	492 448	4 577 329	962
	SMC06	San Marco dei Cavoti	492 600	4 576 998	916
	MOL01	Molinara	492 767	4 576 656	914
	MOL08	Molinara	492 894	4 576 294	922
FORTORE_3	MOL02	Molinara	493 102	4 575 964	908
	MOL03	Molinara	493 503	4 575 787	905
	MOL04	Molinara	493 686	4 575 365	913
	MOL07	Molinara	493 780	4 574 980	932



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



	MOL05	Molinara	493 889	4 574 693	933
	MOL06	Molinara	495 886	4 574 691	941
FORTORE_4	SGM01	San Giorgio La Molar	496 370	4 573 960	901
	SGM02	San Giorgio La Molar	496 720	4 573 710	887
	SGM03	San Giorgio La Molar	496 050	4 573 350	890
	SGM04	San Giorgio La Molar	496 189	4 572 643	902
	SGM05	San Giorgio La Molar	497 390	4 572 721	875
	SGM06	San Giorgio La Molar	496 629	4 572 298	863

Tab. 1. Denominazione, posizione ed altitudine dei 24 aerogeneratori

STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA
 Ing. Mezzina Antonio
 San Severo

4. CARATTERISTICHE DELL'AEROGENERATORE.

Come sopra già descritto, l'impianto eolico proposto sarà costituito da n. 24 aerogeneratori della potenza uninominale di 6.1MWe, con altezza di mozzo (h_h) 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.

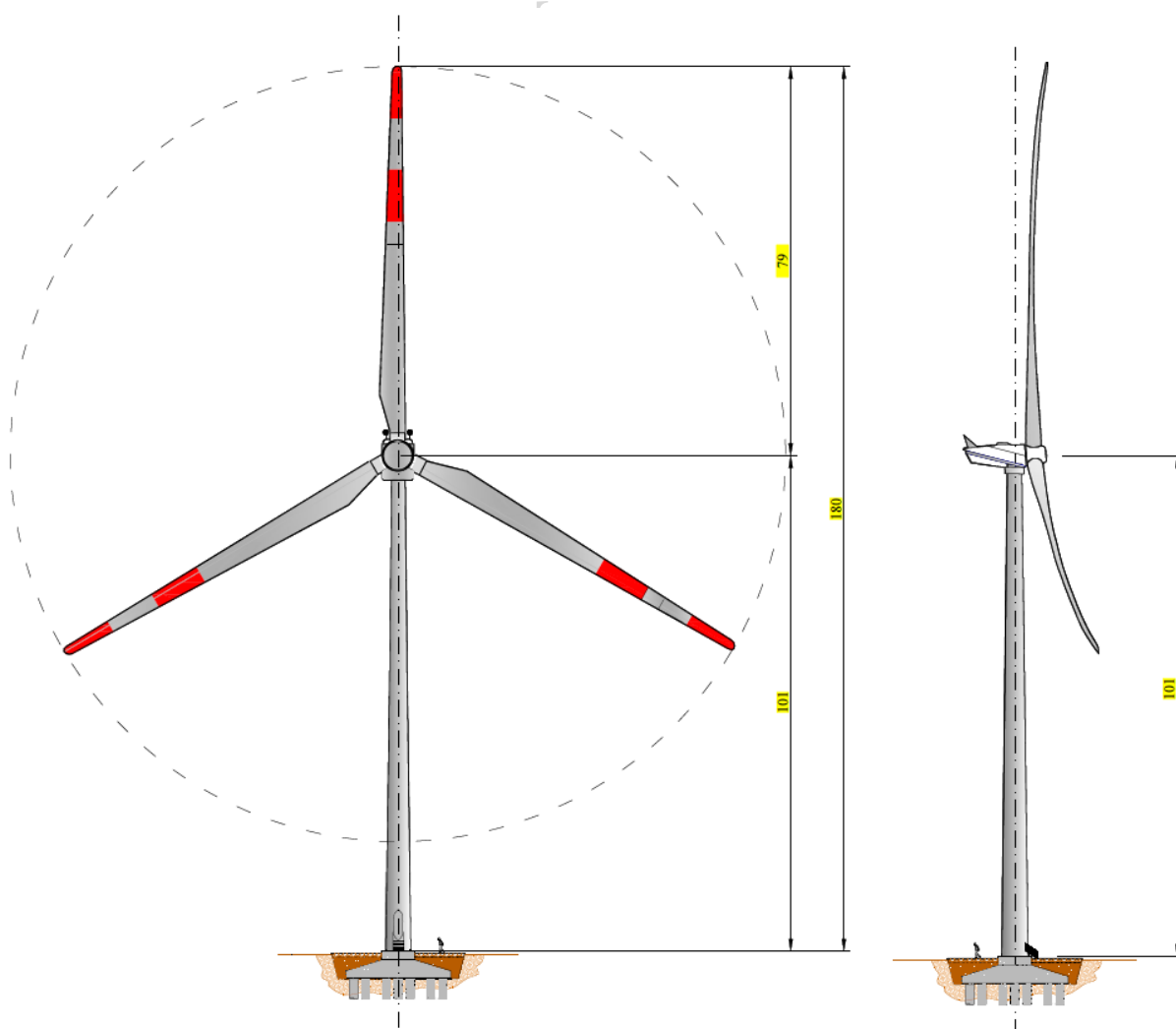


Fig. 9. Schema dimensionale dell'aerogeneratore ipotizzato da IVPC.

Come detto in premessa, in questo studio progettuale si farà riferimento ad una turbina avente le caratteristiche dimensionali individuate da IVPC, precisando che il modello definitivo di macchina sarà individuato solo al momento della cantierizzazione, sulla base dello stato dell'arte della tecnologia pur restando entro i limiti dimensionali autorizzati o autorizzabili in variante.

Pertanto, per lo studio progettuale è stata presa in considerazione una General Electric GE158 che ha le medesime caratteristiche dimensionali dell'aerogeneratore di progetto, avente un'altezza al mozzo pari a 101 metri ed un diametro del rotore pari a 158 metri.

3 Technical Data for the Cypress-158

Turbine	4.2/4.5/4.8/5.0/5.2/5.3/5.5 158
Rated output [MW]	4.2/4.5/4.8/5.0/5.2/5.3/5.5
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]	74.5 (4.2/4.5/4.8) 80.3 (5.0/5.2/5.3/5.5)
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

Fig. 10. Estratto dal data sheet di una GE158 Cypress, con il valore della velocità tangenziale massima in punta delle pale. Alla velocità in punta di 80.2m/s corrisponde un velocità di rotazione pari a circa 9,7 rivoluzioni per minuto.

La velocità angolare del rotore dell'aerogeneratore consentita nelle normali condizioni di operatività è, per questa classe di macchine, inferiore ai 10 giri al minuto (9.7 rpm nel caso di studio); i sistemi di controllo dell'aerogeneratore, istante per istante, cercano di inseguire tale velocità di massimo rendimento. Qualora ciò non riuscisse interviene il sistema di sicurezza settato per arrestare completamente la macchina ad un numero di giri che, per questa classe dimensionale di macchine, è oggi compreso tra i 10 ed i 12 rpm. Quest'ultimo valore, si ribadisce, non è da confondere con la velocità operativa essendo un sistema di sicurezza di seconda guardia.

Ai fini dei calcoli si farà riferimento alla massima velocità della classe di aerogeneratori di progetto.

E' bene precisare che oltre una certa velocità del vento l'aerogeneratore viene arrestato, con le pale posizionate in assetto di sicurezza, per evitare rischi di rottura della macchina.

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 alle 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.

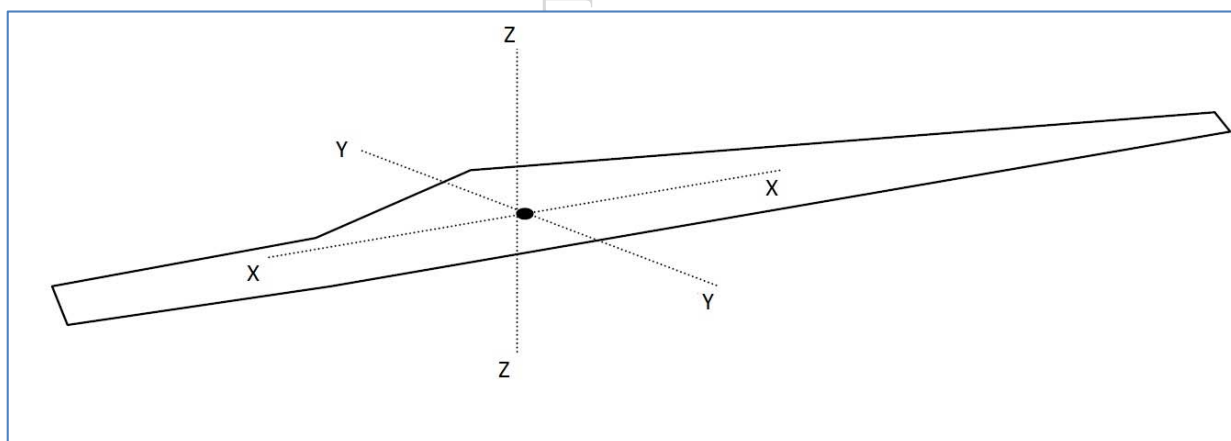


Fig. 11. Sistema di coordinate usato per la pala



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.

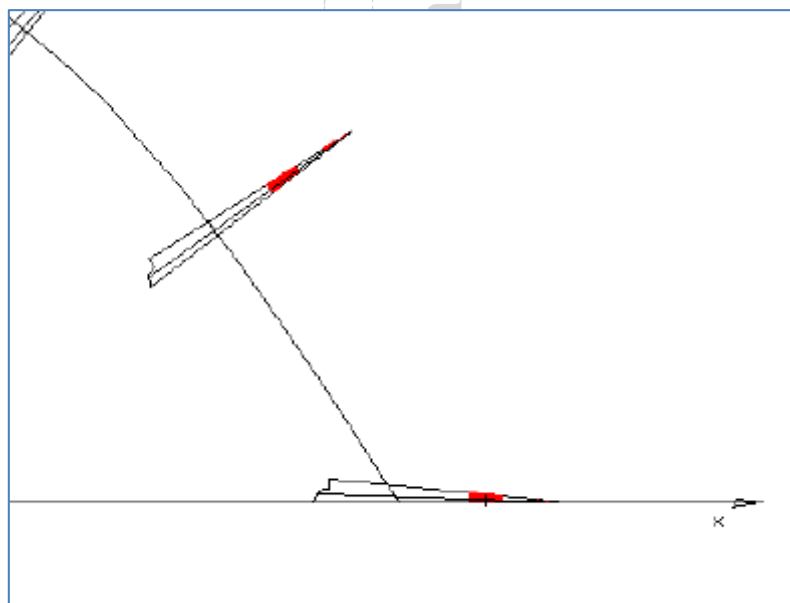


Fig. 12. Simulazione del comportamento della pala al momento del contatto con il terreno: alla posizione del centro di massa va sommata la lunghezza eccedente della pala.

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. 12**.

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:

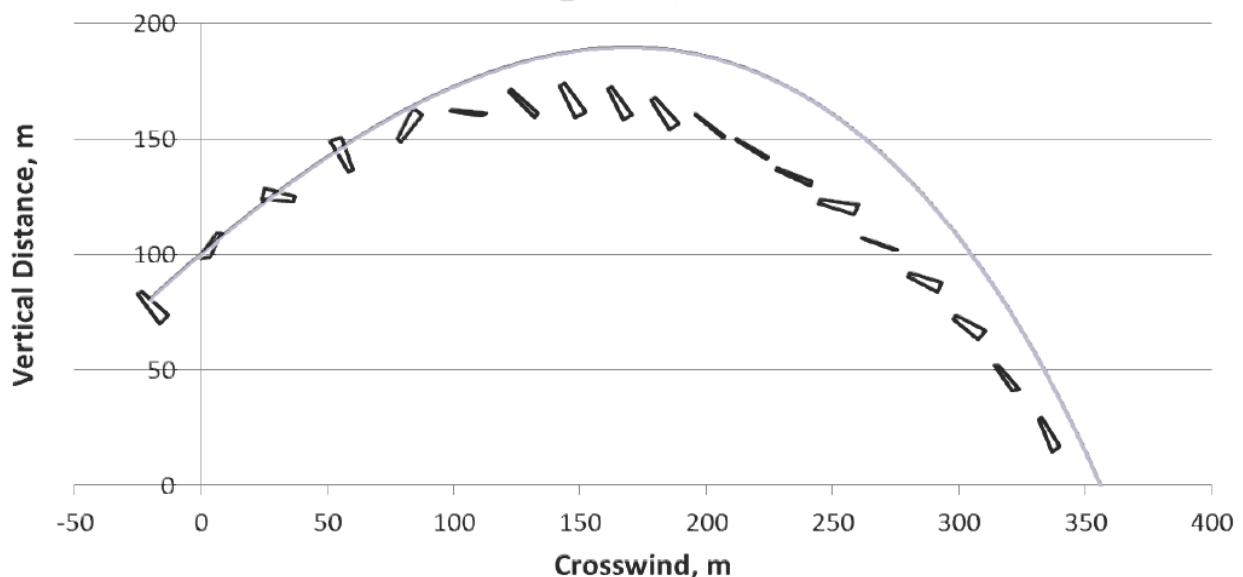


Fig. 13. Modellizzazione della traiettoria ed orientamento di un frammento da 10m per una torre da 1.5MW, rotore da 70m e hub da 80, con velocità angolare pari a 26.3rpm.

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



In figura 13, 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.

STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA
Ing. Mezzina Antonio
San Severo

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.

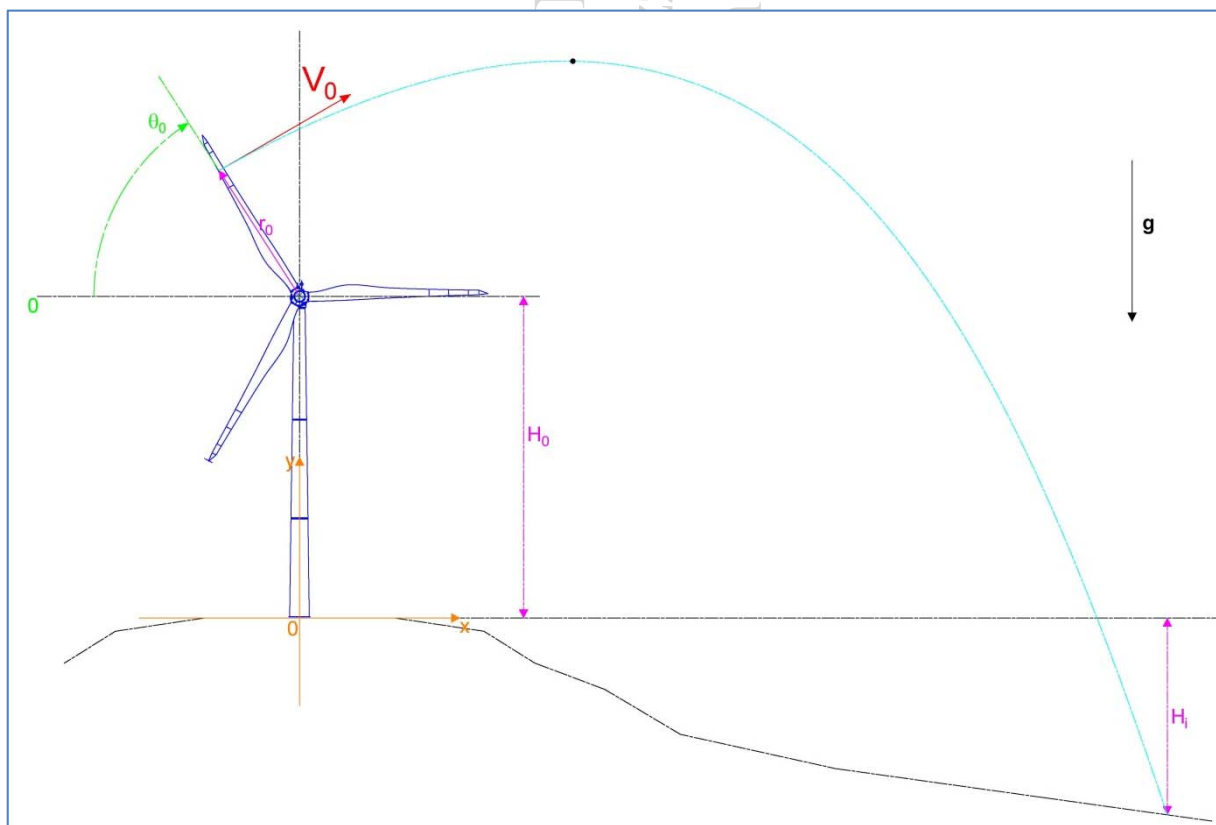


Fig. 14. Schema di massima del fenomeno oggetto di studio.

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:

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

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:

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

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:

$$x(t) = \frac{1}{k_x} \ln |(k_x V \sin \alpha_0) t + 1| - r_0 \cos \alpha_0 \quad [6]$$

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:

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

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:

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

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

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

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:

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

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

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

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:

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

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:

		<i>Full blade</i>	<i>10m</i>	<i>5m</i>
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. 2. 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 consentita dai sistemi di sicurezza della macchina di prima e di seconda guardia e pari a 12 giri/min (ω_0) per la GE158.



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 è riportato nella seguente tabella. L'origine riferimento non è stata trovata, 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. 3. Specifiche tecniche della V136.

Si è utilizzata la posizione del centro di massa rinveniente dalla Tab. 2.

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. 4. Valori utilizzati per il calcolo

Il calcolo della gittata massima è stato poi effettuato implementando le equazioni descritte al paragrafo precedente su foglio excel, 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:

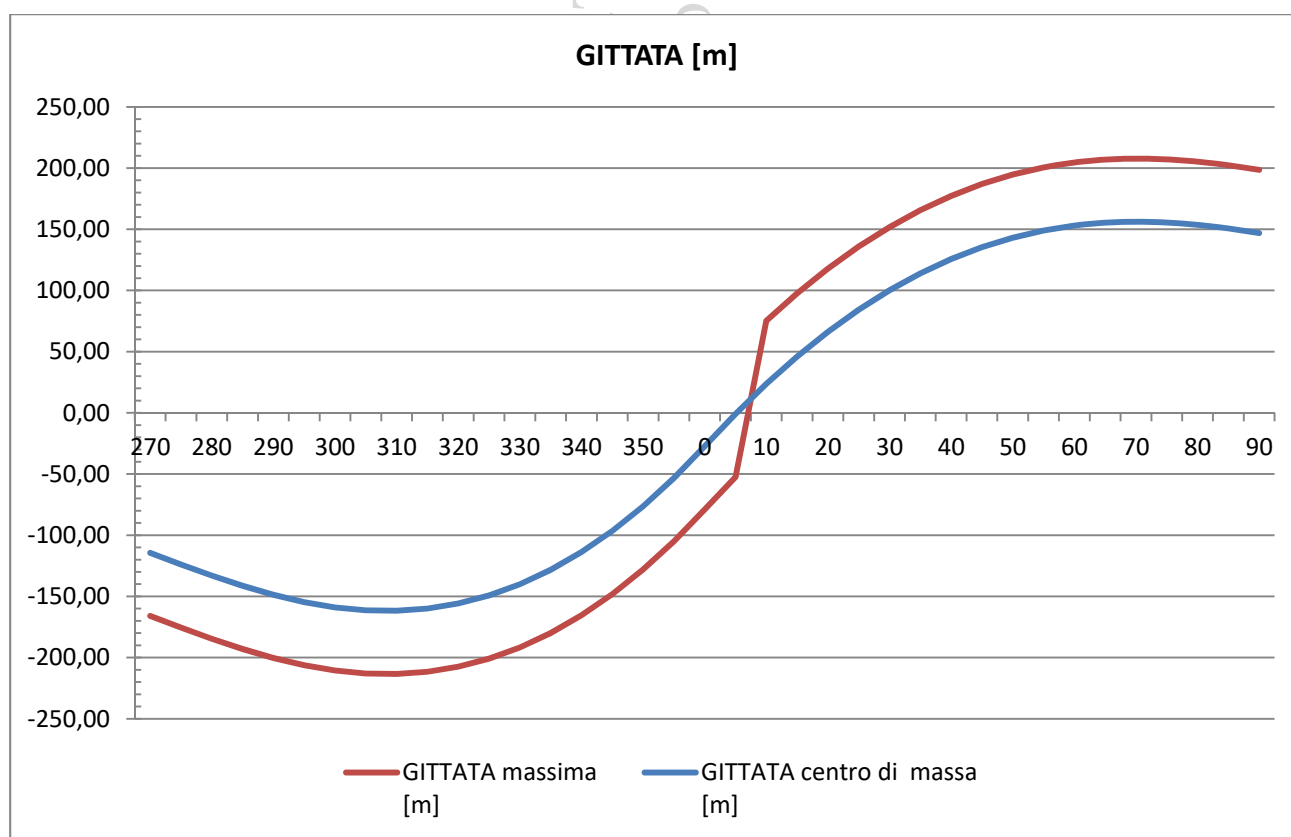


Fig. 15. Gittate al variare dell'angolo di distacco per la rottura dell'intera pala.

I valori massima di gittata ed elevazione massima, approssimati all'intero multiplo di 5 superiore, nelle condizioni di calcolo sono stati individuati come segue:

Angolo di massima gittata	310°	Angolo di massima elevazione	20°
Tempo di volo [s]	7		
Gittata del centro di massa [m]	165		
Gittata massima [m]	215	Elevazione massima [m]	160

⁷ Per il sistema di riferimento adottato si rimanda alla Fig. 144

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. 5. Valori utilizzati per il calcolo

Si è utilizzata la posizione del centro di massa rinveniente dalla Tab. 2.

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

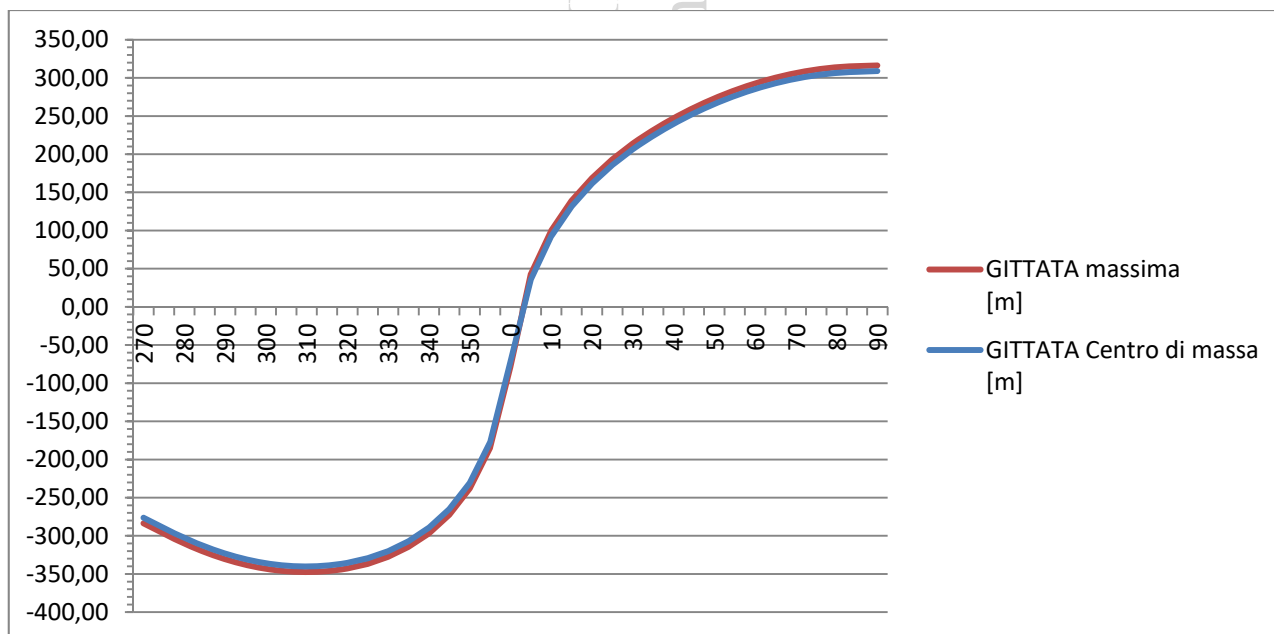


Fig. 16. Gittate al variare dell'angolo di distacco per la rottura del frammento da 10m

I valori massima di gittata ed elevazione massima, approssimati all'intero multiplo di 5 superiore, nelle condizioni di

calcolo sono stati individuati come segue:

Angolo di massima gittata	315°	Angolo di massima elevazione	30°
Tempo di volo [s]	10,3		
Gittata del centro di massa [m]	275		
Gittata massima [m]	285	Elevazione massima [m]	250

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. 6. Valori utilizzati per il calcolo

Si è utilizzata la posizione del centro di massa rinveniente dalla **Tab. 2**.

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

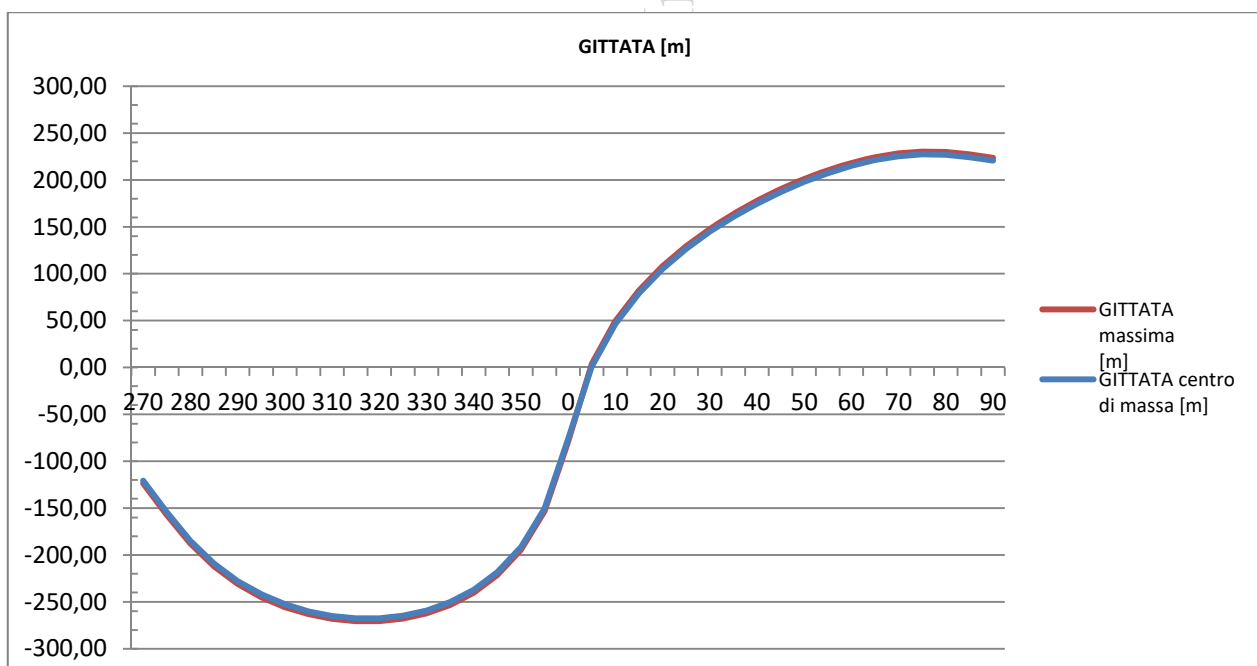


Fig. 17. Gittate al variare dell'angolo di distacco per la rottura del frammento da 5m

I valori massimi di gittata ed elevazione, approssimati all'intero multiplo di 5 superiore, nelle condizioni di calcolo sopra esplicitate, sono stati individuati come segue:

Angolo di massima gittata	315°	Angolo di massima elevazione	35°
Tempo di volo [s]	10,1		
Gittata del centro di massa [m]	270		
Gittata massima [m]	275	Elevazione massima [m]	250

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	Massa del proietto	Elevazione massima	Tempo di volo per gittata massima	Gittata
<i>Rottura dell'intera pala</i>	20000 kg	160 m	7,0 s	215 m
<i>Rottura di un frammento distante 10 m dalla punta della pala</i>	385 kg	285 m	10,3 s	250 m
<i>Rottura di un frammento distante 5 m dalla punta della pala</i>	126 kg	275 m	10,1 s	250 m

Tab. 7. Riepilogo delle simulazioni effettuate

Il massimo valore di gittata calcolato tra tutti i casi considerati è pari a **285,00 m**, per il frammento di 10m. Tale valore deve essere confrontato 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 Baselice	5200 m
Centro abitato di Foiano di Valfortore	4000 m
Centro abitato di San Marco dei Cavoti	3700 m
Centro abitato di Molinara	3600 m
Centro abitato di San Giorgio La Molara	3500m
Centro abitato di Montefalcone di Valfortore	3350 m
S.P. 116	1675 m
S.P. 30	670 m
S.P. 45	295 m
S.P. "ex S.S.369"	190 m

Tab. 8. Elenco elementi urbanistici e infrastrutturali sensibili nell'area del parco eolico. In giallo, è stato evidenziato l'unico elemento situato ad una distanza critica rispetto alla massima gittata della macchina MOL 03 e MOL 02, inferiore rispetto alla gittata dei frammenti di pala: la Strada Provinciale "ex SS 369".

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 recettori, già graficamente identificati in magenta nelle fig. 7 ed 8, sono i fabbricati in appresso elencati:

CODICE ricettore	UTM - EST [m]	UTM - NORD [m]	altitudine [m s.l.m.]	minima distanza	da torre	quota base torre
A	491 734	4 578 251	903	495	SMC03	1.000
B	493 799	4 578 584	883	460	FVF01	936
C	493 906	4 578 271	889	583	FVF01	936
D	493 775	4 578 294	897	453	FVF01	936
E	493 824	4 578 133	905	573	FVF01	936
F	493 363	4 578 017	919	445	FVF01	936
G	496 649	4 575 498	779	1 110	MOL06	941
H	494 856	4 571 786	793	1 585	SGM04	902
I	496 609	4 571 009	817	1 290	SGM06	863
J	498 548	4 571 918	853	1 410	SGM05	875
K	493 292	4 576 267	886	358	MOL02	908
L	493 749	4 576 449	851	706	MOL03	905
M	493 784	4 576 412	852	685	MOL03	905

N	493 621	4 577 477	893	1 020	FVF01	936
O	494 633	4 576 820	815	1 530	MOL03	905
P	494 684	4 576 628	785	1 450	MOL03	905
Q	494 826	4 576 607	767	1 557	MOL03	905
R	496 659	4 575 537	772	1 146	MOL06	941
S	496 996	4 575 344	792	1 288	MOL06	941

Tab. 9. Elenco dei ricettori, loro posizione e minime distanze dalle macchine

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

Dalla lettura della **Tab. 9** qui proposta si desume che la condizione più sfavorevole di lancio è quella relativa al ricettore contrassegnato dal codice **K**, situato a 358m *-misurati in piano-* dalla macchina **MOL02**, e pertanto di molto oltre il lancio calcolato di 285m. Tale ricettore è così catastalmente censito:

Elenco Immobili

Foglio	Particella	Sub	Indirizzo	Zona cens	Categoria	Classe	Consistenza	Rendita	Partita	Altri Dati
1	376		CONTRADA FILCETA Piano S1-T - 1		A07	01	11,5 vani	R.Euro:742,41		

Anche assumendo come quota del piede torre la differenza di altimetria, pari a 22m in meno del ricettore rispetto al piede torre, e ripetendo il calcolo, **si arriva ad un lancio limite pari a 290m**: pertanto il ricettore si trova in completa sicurezza.

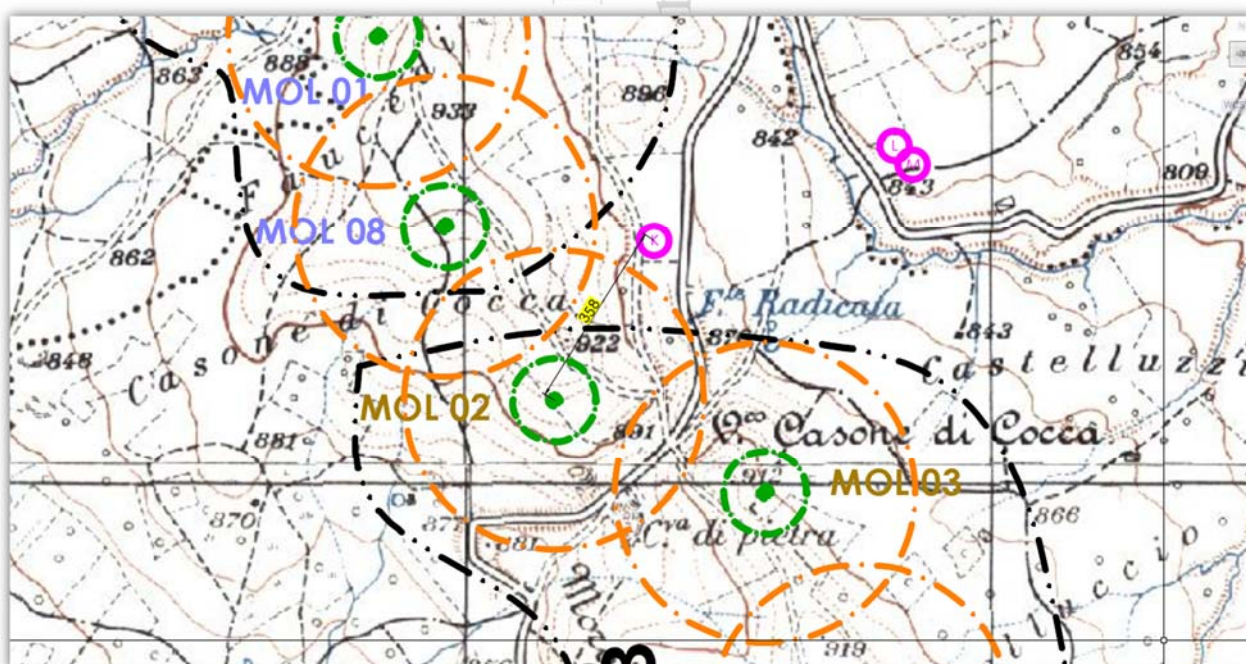


Fig. 18. Inquadramento del ricettore K rispetto alla macchina MOL02 ed alle altre limitrofe, su IGM: in arancio il raggio di massima gittata.

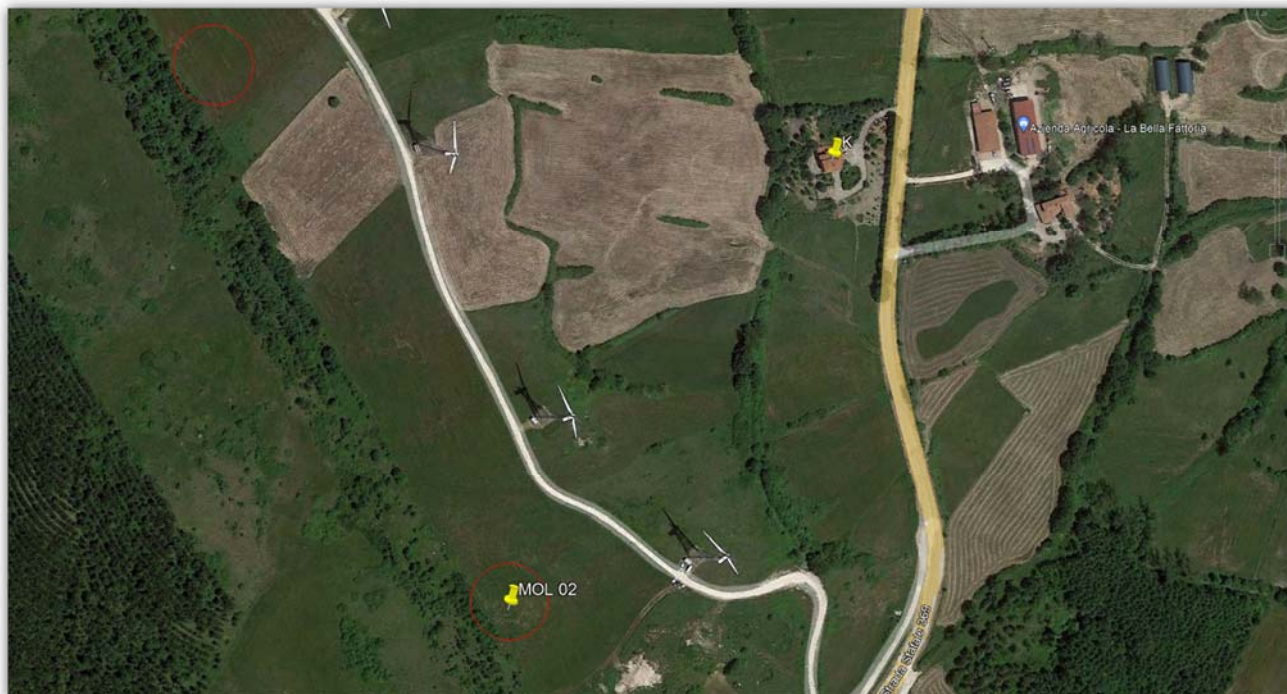


Fig. 19. Posizione di dettaglio del recettore K rispetto alla macchina MOL02, su ortofoto Google.

In definitiva l'unico recettore sensibile situato all'interno del possibile cono di lancio è la Strada Provinciale "ex S.S. 369", oltre 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.



9. CONCLUSIONI.

Non sono presenti nelle vicinanze degli aerogeneratori, ed in particolare nel cono di lancio, calcolato nelle condizioni peggiori al massimo in circa **285m**, insediamenti abitativi a carattere continuativo.

Il fabbricato più critico, individuato come K, situato a circa 380m dalla macchina MOL02, è situato comunque ben oltre il cono di lancio.

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.

Si tenga conto inoltre che tutti gli aerogeneratori sono dotati di un complesso sistema parafulmine, e di un sistema di segnalazione luminosa che rende estremamente improbabile l'ipotesi di un urto accidentale contro un corpo di massa sufficiente a determinare la rottura di un frammento di pala.

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 nei casi di studio presi in esame risulta essere inferiore alla distanza degli aerogeneratori dagli elementi sensibili abitati più vicini.

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.

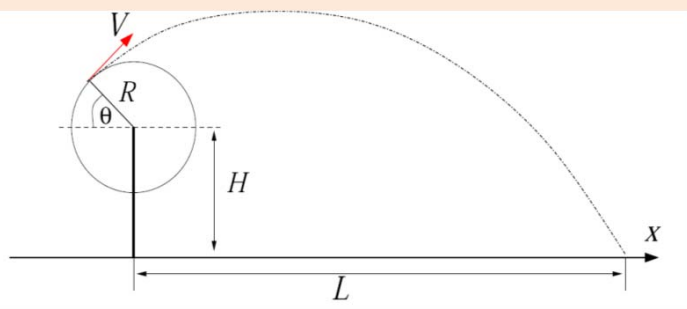
San Severo, Dicembre 2021

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

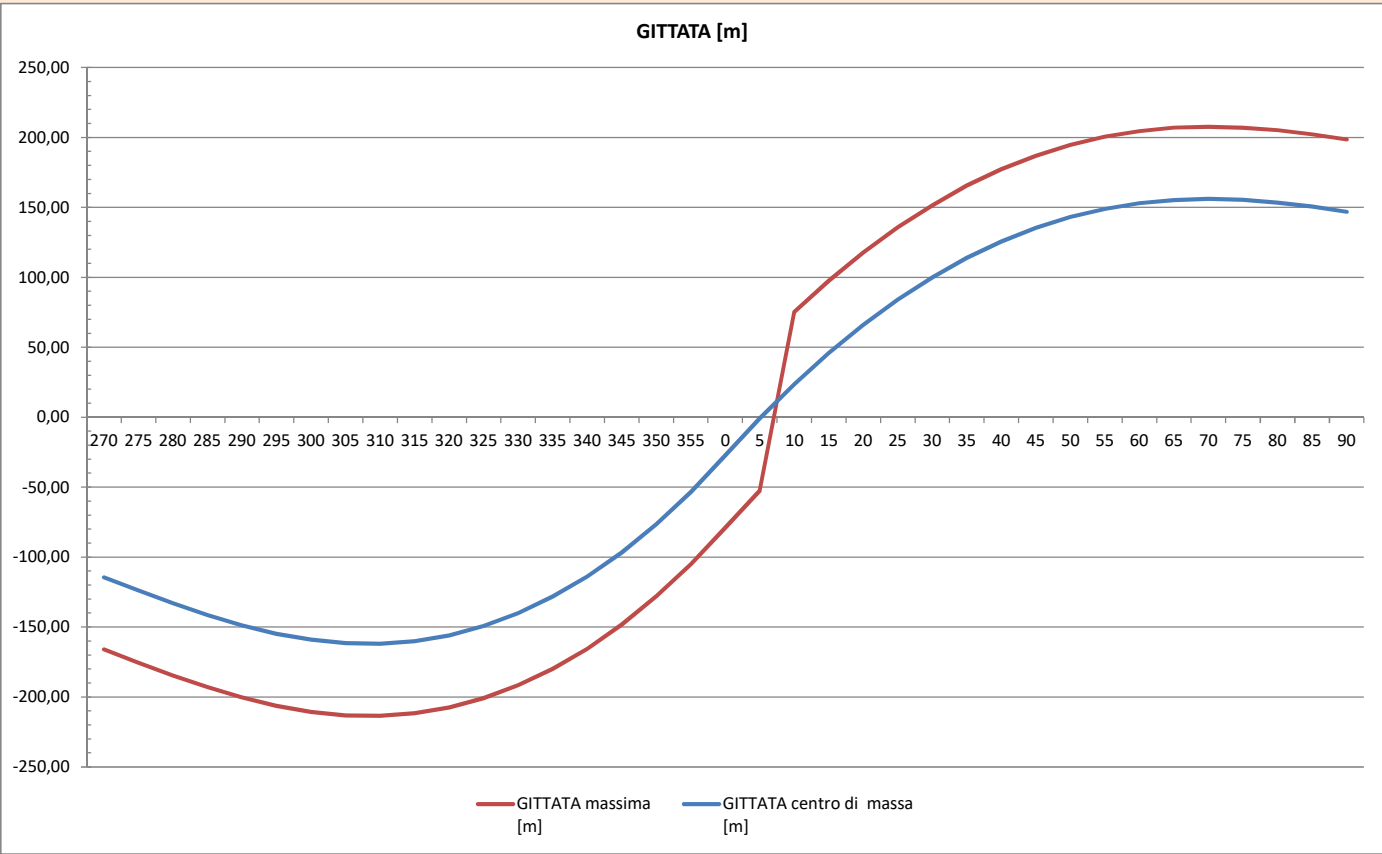


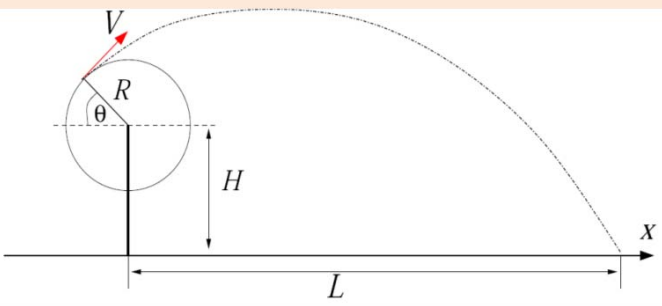
Inserire le variabili del sistema nei campi in bianco sottostanti

Diamentro del rotore (m)	158
Lunghezza della pala (m)	77,4
Raggio al centro di massa del frammento (m)	27,38
Distanza punta frammento dal centro di massa (m)	51,62
Altezza mozzo (m)	101
Quota del piede della torre rispetto ad area circostante	0
Velocità angolare (rpm)	12
densità aria	1,125
Superficie frontale Sx	6,55
Coefficiente di resistenza Cx	0,35
Superficie frontale Sy	215,8
Coefficiente di resistenza Cy	0,8
Superficie frontale Sz	79,6
Coefficiente di resistenza Cz	0,65
Massa della pala	20000

Angolo di distacco (gradi°)	GITTATA centro di massa [m]	GITTATA massima [m]	Vx	Vy	Tmax (istante di inversione del moto)	Ymax	Td tempo di discesa	Tv Tempo di volo
270	-114,39	166,01	-34,41	0,00	0,00	73,62	4,03	4,0317
275	-123,92	175,54	-34,28	3,00	0,31	74,18	4,05	4,3537
280	-133,04	184,66	-33,88	5,97	0,61	75,84	4,10	4,7038
285	-141,43	193,05	-33,23	8,91	0,90	78,54	4,18	5,0753
290	-148,74	200,36	-32,33	11,77	1,18	82,17	4,28	5,4608
295	-154,69	206,31	-31,18	14,54	1,45	86,60	4,40	5,8522
300	-158,99	210,61	-29,80	17,20	1,70	91,68	4,54	6,2421
305	-161,43	213,05	-28,18	19,73	1,93	97,24	4,69	6,6234
310	-161,81	213,43	-26,36	22,12	2,14	103,13	4,85	6,9903
315	-159,98	211,60	-24,33	24,33	2,33	109,18	5,00	7,3378
320	-155,81	207,43	-22,12	26,36	2,50	115,26	5,16	7,6620
325	-149,20	200,82	-19,73	28,18	2,65	121,22	5,31	7,9597
330	-140,05	191,67	-17,20	29,80	2,78	126,96	5,45	8,2287
335	-128,28	179,90	-14,54	31,18	2,89	132,37	5,58	8,4672
340	-113,81	165,43	-11,77	32,33	2,98	137,36	5,70	8,6738
345	-96,55	148,17	-8,91	33,23	3,05	141,86	5,80	8,8477
350	-76,44	128,06	-5,97	33,88	3,09	145,80	5,89	8,9882
355	-53,40	105,02	-3,00	34,28	3,12	149,15	5,97	9,0948
0	-27,38	79,00	0,00	34,41	3,13	151,87	6,03	9,1670
5	-0,85	52,47	3,00	34,28	3,12	153,93	6,08	9,2047
10	23,62	75,24	5,97	33,88	3,09	155,31	6,11	9,2076
15	45,97	97,59	8,91	33,23	3,05	156,03	6,13	9,1758
20	66,17	117,79	11,77	32,33	2,98	156,09	6,13	9,1094
25	84,22	135,84	14,54	31,18	2,89	155,51	6,12	9,0085
30	100,13	151,75	17,20	29,80	2,78	154,34	6,09	8,8739
35	113,93	165,55	19,73	28,18	2,65	152,63	6,05	8,7062
40	125,66	177,28	22,12	26,36	2,50	150,45	6,00	8,5068
45	135,37	186,99	24,33	24,33	2,33	147,90	5,94	8,2775
50	143,11	194,73	26,36	22,12	2,14	145,07	5,88	8,0205
55	148,95	200,57	28,18	19,73	1,93	142,10	5,81	7,7390
60	152,99	204,61	29,80	17,20	1,70	139,10	5,74	7,4367
65	155,32	206,94	31,18	14,54	1,45	136,23	5,67	7,1183
70	156,10	207,72	32,33	11,77	1,18	133,63	5,61	6,7890
75	155,46	207,08	33,23	8,91	0,90	131,44	5,55	6,4546
80	153,59	205,21	33,88	5,97	0,61	129,77	5,51	6,1212
85	150,67	202,29	34,28	3,00	0,31	128,73	5,49	5,7948
90	146,90	198,52	34,41	0,00	0,00	128,38	5,48	5,4808

	cittata CoG	gittata max	angolo	tempo volo	H max
MAX	161,81	213,43	310,00	6,990315715	156,09



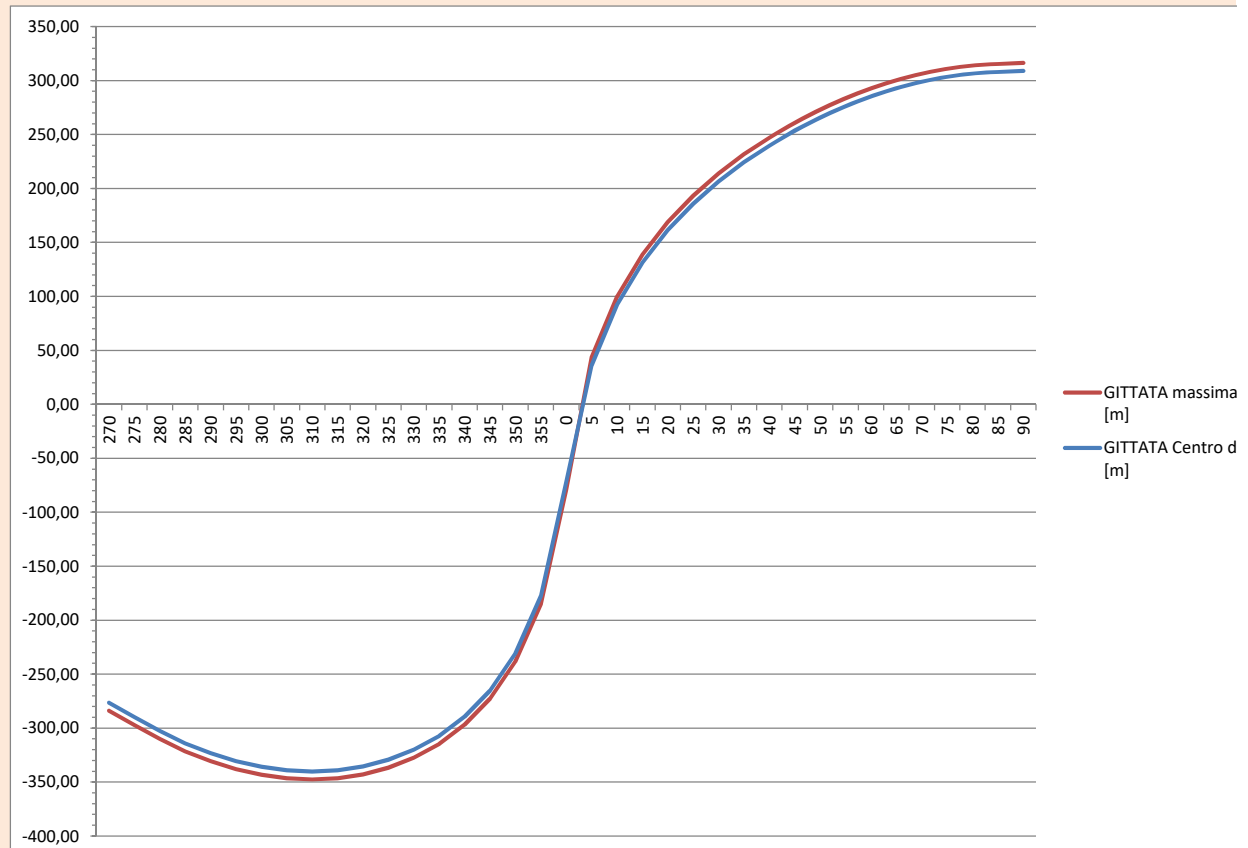


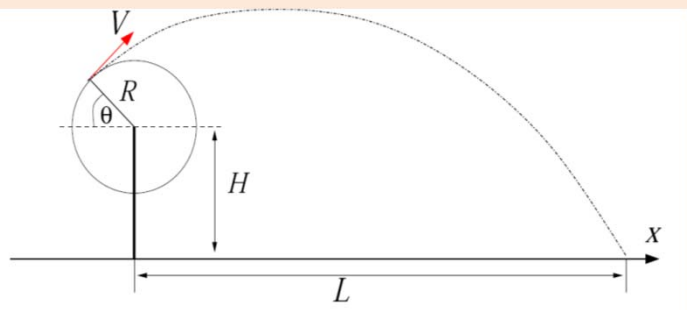
Inserire le variabili del sistema nei campi in bianco sottostanti

Diamentro del rotore (m)	158
Lunghezza del frammento [m]	10
Raggio al centro di massa del frammento (m)	71,6
Distanza punta frammento dal centro di massa (m)	7,4
Altezza mozzo (m)	101
Quota del piede della torre rispetto ad area circostante	300
Velocità angolare (rpm)	12
densità aria	1,225
Superficie frontale Sx	0,3
Coefficiente di resistenza Cx	0,45
Superficie frontale Sy	13,65
Coefficiente di resistenza Cy	0,6
Superficie frontale Sz	2,7
Coefficiente di resistenza Cz	0,4
Massa del frammento	385

Angolo di distacco (gradi°)	GITTATA Centro di massa [m]	GITTATA assoluta	Vx	Vy	Tmax (istante di inversione del moto)	Ymax	Td tempo di discesa	Tv Tempo di volo
270	-276,24	283,64	-89,98	0,00	0,00	329,40	12,03	12,0290
275	-289,73	297,13	-89,63	7,84	0,79	332,73	12,13	12,9123
280	-302,59	309,99	-88,61	15,62	1,49	341,79	12,39	13,8859
285	-313,91	321,31	-86,91	23,29	2,09	354,57	12,76	14,8501
290	-323,28	330,68	-84,55	30,77	2,56	369,12	13,19	15,7464
295	-330,58	337,98	-81,55	38,03	2,93	384,16	13,63	16,5546
300	-335,81	343,21	-77,92	44,99	3,21	398,98	14,06	17,2756
305	-338,97	346,37	-73,70	51,61	3,44	413,25	14,48	17,9187
310	-340,05	347,45	-68,93	57,83	3,62	426,84	14,87	18,4946
315	-338,93	346,33	-63,62	63,62	3,76	439,72	15,25	19,0131
320	-335,44	342,84	-57,83	68,93	3,88	451,89	15,61	19,4825
325	-329,29	336,69	-51,61	73,70	3,97	463,37	15,94	19,9088
330	-320,07	327,47	-44,99	77,92	4,04	474,17	16,26	20,2970
335	-307,13	314,53	-38,03	81,55	4,10	484,30	16,55	20,6505
340	-289,41	296,81	-30,77	84,55	4,14	493,78	16,83	20,9715
345	-265,10	272,50	-23,29	86,91	4,18	502,58	17,08	21,2614
350	-230,65	238,05	-15,62	88,61	4,20	510,69	17,32	21,5210
355	-177,38	184,78	-7,84	89,63	4,21	518,08	17,54	21,7502
0	-71,60	79,00	0,00	89,98	4,22	524,72	17,73	21,9483
5	35,90	43,30	7,84	89,63	4,21	530,56	17,90	22,1143
10	92,56	99,96	15,62	88,61	4,20	535,55	18,05	22,2465
15	131,59	138,99	23,29	86,91	4,18	539,64	18,17	22,3428
20	161,54	168,94	30,77	84,55	4,14	542,75	18,26	22,4005
25	185,92	193,32	38,03	81,55	4,10	544,82	18,32	22,4163
30	206,49	213,89	44,99	77,92	4,04	545,77	18,34	22,3862
35	224,26	231,66	51,61	73,70	3,97	545,50	18,34	22,3054
40	239,81	247,21	57,83	68,93	3,88	543,94	18,29	22,1683
45	253,51	260,91	63,62	63,62	3,76	540,98	18,21	21,9678
50	265,59	272,99	68,93	57,83	3,62	536,54	18,08	21,6956
55	276,17	283,57	73,70	51,61	3,44	530,56	17,90	21,3418
60	285,28	292,68	77,92	44,99	3,21	523,00	17,68	20,8947
65	292,91	300,31	81,55	38,03	2,93	513,94	17,42	20,3423
70	298,99	306,39	84,55	30,77	2,56	503,69	17,12	19,6739
75	303,46	310,86	86,91	23,29	2,09	492,89	16,80	18,8877
80	306,37	313,77	88,61	15,62	1,49	482,82	16,51	18,0029
85	307,97	315,37	89,63	7,84	0,79	475,38	16,29	17,0773
90	308,85	316,25	89,98	0,00	0,00	472,60	16,21	16,2101

	cittata CoG	gittata max	angolo	tempo volo	H max
MAX	340,05	347,45	310,00	18,494604	545,77





Inserire le variabili del sistema nei campi sottostanti

Diamentro del rotore (m)	158
Lunghezza del frammento [m]	5
Raggio al centro di massa del frammento (m)	76
Distanza punta frammento dal centro di massa (m)	3
Altezza mozzo (m)	101
Quota del piede della torre rispetto ad area circostante	0
Velocità angolare (rpm)	12
densità aria	1,225
Superficie frontale Sx	0,176
Coefficiente di resistenza Cx	0,35
Superficie frontale Sy	5,32
Coefficiente di resistenza Cy	0,6
Superficie frontale Sz	1,05
Coefficiente di resistenza Cz	0,4
Massa del frammento	126

Angolo di distacco (gradi°)	GITTATA centro di massa [m]	GITTATA massima [m]	Vx	Vy	Tmax (istante di inversione del moto)	Ymax	Td tempo di discesa	Tv Tempo di volo
270	-120,69	123,69	-95,50	0,00	0,00	25,00	2,35	2,3471
275	-154,36	157,36	-95,14	8,32	0,83	28,71	2,53	3,3601
280	-184,86	187,86	-94,05	16,58	1,56	38,60	2,98	4,5400
285	-209,17	212,17	-92,25	24,72	2,15	52,12	3,53	5,6827
290	-227,80	230,80	-89,74	32,66	2,61	67,07	4,10	6,7013
295	-241,93	244,93	-86,56	40,36	2,95	82,18	4,63	7,5860
300	-252,49	255,49	-82,71	47,75	3,22	96,85	5,14	8,3538
305	-260,10	263,10	-78,23	54,78	3,42	110,87	5,61	9,0262
310	-265,07	268,07	-73,16	61,39	3,58	124,16	6,04	9,6220
315	-267,55	270,55	-67,53	67,53	3,71	136,76	6,45	10,1556
320	-267,53	270,53	-61,39	73,16	3,81	148,69	6,83	10,6382
325	-264,87	267,87	-54,78	78,23	3,89	159,99	7,19	11,0777
330	-259,29	262,29	-47,75	82,71	3,95	170,68	7,53	11,4797
335	-250,31	253,31	-40,36	86,56	4,00	180,79	7,85	11,8483
340	-237,14	240,14	-32,66	89,74	4,04	190,31	8,15	12,1860
345	-218,40	221,40	-24,72	92,25	4,07	199,24	8,43	12,4945
350	-191,49	194,49	-16,58	94,05	4,09	207,56	8,69	12,7743
355	-150,50	153,50	-8,32	95,14	4,10	215,23	8,93	13,0254
0	-76,00	79,00	0,00	95,50	4,10	222,22	9,15	13,2472
5	0,77	3,77	8,32	95,14	4,10	228,48	9,34	13,4384
10	46,28	49,28	16,58	94,05	4,09	233,95	9,51	13,5973
15	79,09	82,09	24,72	92,25	4,07	238,58	9,65	13,7217
20	104,95	107,95	32,66	89,74	4,04	242,30	9,77	13,8087
25	126,38	129,38	40,36	86,56	4,00	245,03	9,86	13,8549
30	144,69	147,69	47,75	82,71	3,95	246,68	9,91	13,8564
35	160,65	163,65	54,78	78,23	3,89	247,17	9,92	13,8080
40	174,68	177,68	61,39	73,16	3,81	246,39	9,90	13,7039
45	187,06	190,06	67,53	67,53	3,71	244,24	9,83	13,5368
50	197,90	200,90	73,16	61,39	3,58	240,60	9,72	13,2977
55	207,25	210,25	78,23	54,78	3,42	235,38	9,56	12,9755
60	215,05	218,05	82,71	47,75	3,22	228,49	9,34	12,5568
65	221,15	224,15	86,56	40,36	2,95	219,94	9,07	12,0260
70	225,33	228,33	89,74	32,66	2,61	209,90	8,76	11,3670
75	227,30	230,30	92,25	24,72	2,15	198,94	8,42	10,5699
80	226,88	229,88	94,05	16,58	1,56	188,29	8,08	9,6468
85	224,29	227,29	95,14	8,32	0,83	180,13	7,83	8,6586
90	220,63	223,63	95,50	0,00	0,00	177,00	7,73	7,7294

	cittata CoG	gittata max	angolo	tempo volo	H max
MAX	267,55	270,55	315,00	10,15564424	247,17

