



# REGIONE SARDEGNA

## Provincia di Cagliari

### COMUNI DI SINNAI E MARACALAGONIS



OGGETTO

PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)

PROPONENTE



### ECOWIND 6 S.R.L.

Via Alessandro Manzoni 30, 20121 Milano (MI)  
C.F./P.IVA: 12809780963  
email/PEC: ecowind6srl@pecimprese.it

SVILUPPO



### VALLEVERDE ENERGIA S.R.L.

Via Foggia 174, 85025 Melfi (PZ)  
C.F./P.IVA: 02118870761  
email: info@valleverde-energia.it  
PEC: valleverde.energia@pec.it

Codice Commessa PHEEDRA: 24\_01\_EO\_SIN

INGEGNERIA



PHEEDRA S.r.l. Via Lago di Nemi, 90  
74121 - Taranto  
Tel. 099.7722302 - Fax 099.9870285  
e-mail: info@pheedra.it  
web: www.pheedra.it

Direttore Tecnico Ing. Angelo Micolucci



00	Febbraio 2024	PRIMA EMISSIONE	MS	AM	VS
REV	DATA	ATTIVITA'	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

OGGETTO DELL'ELABORATO

## GITTATA MASSIMA ROTANDA ELEMENTI ROTANTI

FORMATO	SCALA	CODICE DOCUMENTO					NOME FILE	FOGLI
		SOC.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.		
A4	-	SIN	AMB	REL	050	00	SIN-AMB-REL-050_00	

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <p style="text-align: right;"><b>SIN-AMB-REL-050_00</b></p>
--	---	---

## SOMMARIO

<b>1. PREMESSA.....</b>	<b>2</b>
1.1. Inquadramento territoriale .....	2
1.2. Caratteristiche tecniche .....	4
<b>2. GITTATA TEORICA .....</b>	<b>6</b>
<b>3. CALCOLO GITTATA MODELLO V 172 – 7,2 MW.....</b>	<b>10</b>
3.1. Distacco della pala intera .....	11
3.2. Rottura del frammento con lunghezza pari a 10 m .....	15
3.3. Rottura del frammento con lunghezza pari a 5 m .....	19
3.4. Verifica della Gittata rispetto i Recettori e le Strade .....	23
3.5. Valori gittata in caso di rottura per V 172 – 7,2 MW .....	24
<b>4. CONCLUSIONI.....</b>	<b>25</b>

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <b>SIN-AMB-REL-050_00</b>
--	---	---

## 1. PREMESSA

La presente relazione descrive un "Parco Eolico" per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile di tipo eolica, e la conseguente immissione dell'energia prodotta, attraverso la dedicata rete di connessione, sino alla Rete di Trasmissione Nazionale.

Il progetto riguarda la realizzazione di un impianto eolico composto da 17 aerogeneratori ognuno da 7,2 MW da installare nei comuni di Sinnai e Maracalagonis (CA) con opere di connessione ricadenti nei medesimi comuni e nei comuni di Quartucciu, Settimo San Pietro e Selargius (CA) commissionato dalla società Ecowind 6 Srl.

Gli aerogeneratori saranno collegati tra di loro mediante un cavidotto interrato in media tensione che collegherà l'impianto allo stallo predisposto nella futura Sottostazione Elettrica 30/150 kV per poi collegarsi in alta tensione alla Stazione Elettrica di trasformazione (SE) di trasformazione della RTN a 380/220/150 kV di Selargius.

**L'aerogeneratore preso in considerazione per tale progetto (ovvero modello V 172 – 7,2 MW della Vestas) fa parte di una classe di macchine che possono essere dotate di generatore diversa potenza, in funzione delle esigenze progettuali.**

Il rischio di incidenti connessi all'esercizio di un campo eolico sono particolarmente bassi, in quanto sono pressoché nulli i pericoli di esplosione, di contaminazione, di incendio, poiché ciascun aerogeneratore è costituito da una serie di macchine elettriche che vengono costantemente monitorate e gestite mediante l'utilizzo di stazioni telematiche locali e remote, nonché viene sottoposto a periodiche manutenzioni che ne assicurino il corretto funzionamento e la integrità delle componenti meccaniche, elettriche ed elettroniche. Inoltre, per fugare qualsiasi rischio conseguente alla remota ma sempre possibile rottura accidentale degli aerogeneratori, gli stessi saranno costruiti seguendo le indicazioni di sicurezza previste nelle Linee Guida in materia.

Nello specifico, il PEAR della Sardegna impone che ogni turbina dello schieramento costituente l'impianto eolico deve distare almeno 500 m dall'"edificato urbano", così come definito dall'art. 63 delle NTA del PPR e perimetrato nella cartografia allegata al piano, o, se più cautelativo, dal confine dell'area edificabile del centro abitato come definito dallo strumento urbanistico comunale in vigore al momento del rilascio della autorizzazione alla installazione.

Quindi in ottemperanza a quanto sopra citato, le turbine eoliche saranno installate ad una distanza almeno di 700 m dai centri urbani di Sinnai e Maracalagonis.

### 1.1. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il progetto prevede l'installazione di 17 aerogeneratori di potenza pari a 7,2 MW per una capacità complessiva di 122,4 MW.

Gli aerogeneratori ricadono su un'area posta a Nord, Nord – Est del centro urbano del Comune di Maracalagonis ad una distanza di circa 725 m in linea d'aria, ad Est del centro urbano del Comune di Sinnai ad una distanza di circa 1,3 km, ad Est del centro urbano del Comune di Settimo San Pietro ad una distanza di circa 3,7 km in linea d'aria, ed a Sud – Est dal centro urbano del Comune di Soleminis ad una distanza di circa 4,4 km tutti in provincia di Cagliari.

<b>PHEEDRA Srl</b> Servizi di Ingegneria Integrata Via Lago di Nemi, 90 74121 – Taranto (Italy) Tel. +39.099.7722302 – Fax: +39.099.9870285 Email: info@pheedra.it – web: www.pheedra.it	<b>RELAZIONE SULA GITTATA MASSIMA          DEGLI ELEMENTI ROTANTI</b>	Pagina 2 di 26
---	---	----------------

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <b>SIN-AMB-REL-050_00</b>
--	---	---

Le aree d'impianto sono servite dalla viabilità esistente costituita da strade statali, provinciali, comunali e da strade interpoderali e sterrate. Il tracciato del cavidotto attraversa il territorio dell'agro di Sinnai, Maracalagonis, Quartucciu, Settimo San Pietro E Selargius (CA).

Il parco eolico è circoscritto dalle seguenti strade provinciali, regionali e statali:

- SS 125 – Orientale Sarda
- SP 15
- SP 16
- Strade comunali

L'accesso alle torri è garantito da tutte le strade elencate e strade comunali. La viabilità da realizzare non prevede opere di impermeabilizzazione. Sono inoltre previste piazzole in prossimità degli aerogeneratori.

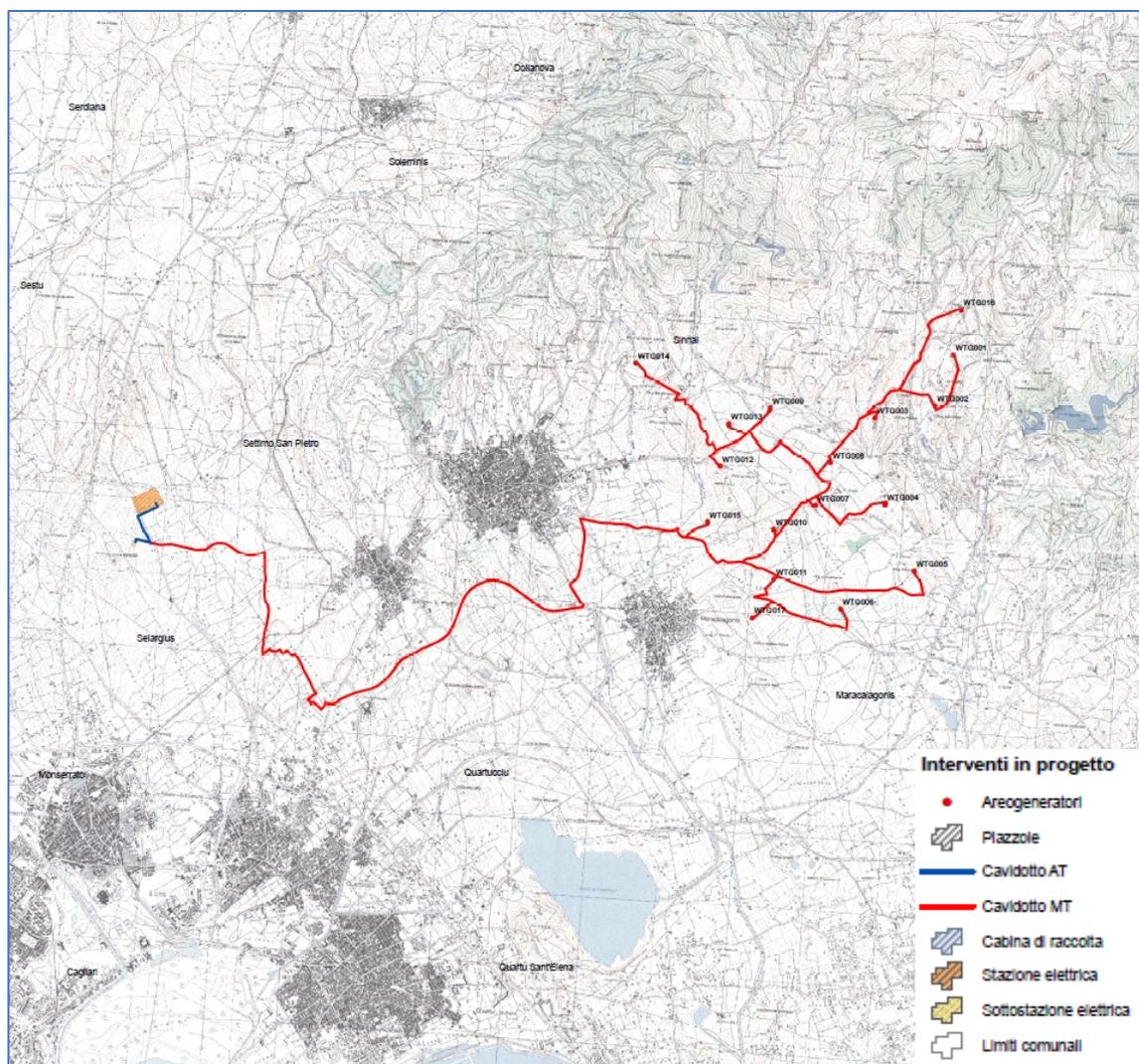


Figura 1 - Inquadramento territoriale IGM 25.000

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <b>SIN-AMB-REL-050_00</b>
--	---	---

Gli aerogeneratori sono localizzabili alle seguenti coordinate, espresse con datum WGS84 e proiezione UTM 33 N, ed ai seguenti estremi catastali:

TURBINA	E (UTM WGS84 33N) [m]	N (UTM WGS84 33N) [m]	COMUNE	FOGLIO	PARTICELLA
WTG01	523452,27720	4352514,32200	SINNAI	33	145
WTG02	523251,99580	4351806,06900	SINNAI	33	20
WTG03	522451,42730	4351591,45100	SINNAI	32	87
WTG04	522666,20450	4350408,98700	SINNAI	49	71
WTG05	523121,48940	4349535,45400	SINNAI	54	132
WTG06	522160,33010	4348954,03400	SINNAI	56	252
WTG07	521730,50360	4350338,68500	SINNAI	49	27
WTG08	521895,12480	4350931,22200	SINNAI	39	78
WTG09	521031,13400	4351615,47900	SINNAI	38	61
WTG10	521183,76780	4349976,88700	MARACALAGONIS	1	62
WTG11	521234,54480	4349302,04800	MARACALAGONIS	1	199
WTG12	520406,96830	4350783,88600	SINNAI	48	129
WTG13	520485,20580	4351376,43300	SINNAI	38	89
WTG14	519172,08330	4352122,17400	SINNAI	29	220
WTG15	520285,58810	4350019,04600	SINNAI	47	415
WTG16	523520,36770	4353131,51000	SINNAI	22	55
WTG17	520975,61250	4348754,80700	MARACALAGONIS	5	126

## 1.2. CARATTERISTICHE TECNICHE

Il parco eolico in progetto prevede l'impiego di aerogeneratori con diametri del rotore pari a 172 m. La procedura seguita per il calcolo della gittata massima, in caso di rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore prende in considerazione le condizioni al contorno più gravose, in maniera tale da aumentare il grado di sicurezza ottenuto dal mero calcolo matematico.

Si sono considerati, per il calcolo della gittata di frammenti della pala in caso di rottura, i seguenti aerogeneratori e le relative caratteristiche fisico-meccaniche.

V 172 – 7,2 MW	
Diametro Rotore [m]	172
Area Spazzata [m <sup>2</sup> ]	23,235

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <p style="text-align: right;"><b>SIN-AMB-REL-050_00</b></p>
--	---	---

Altezza del mozzo [m]	114
Numero di pale	3
Potenza nominale [MW]	7,2
Velocità rotore [rpm]	9,5

*Tabella 1 - Specifiche tecniche dell'aerogeneratore V 172 – 7,2 MW*

La presente relazione è riferita al calcolo della gittata massima di elementi rotanti in caso di rottura accidentale.

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse. Tuttavia, al fine della sicurezza, la stima della gittata massima di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico. Il rischio è considerato in questo contesto come combinazione di due fattori:

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

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

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

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

- il collegamento rigido tra le pale ed il mozzo limita sino a quasi ad annullare il rischio di distacco di una pala;
- le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro e carbonio rinforzato con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche: l'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi ad annullare la probabilità di distacco di parti meccaniche in rotazione: anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono di fatto unita in un unico pezzo (seppure gravemente danneggiato);
- gli aerogeneratori sono dotati di un sistema di supervisione e controllo pale. Il sistema di controllo è basato su un sistema multiprocessore, che gestisce automaticamente tutte le funzioni della turbina come l'avvio, l'arresto, la produzione, la disponibilità dei sottosistemi. Questo sistema consente anche il controllo a distanza dell'aerogeneratore. Il sistema di protezione è un sistema cablato completamente autonomo, capace di arrestare la turbina in

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <p style="text-align: right;"><b>SIN-AMB-REL-050_00</b></p>
--	---	---

qualunque situazione di emergenza, escludendo danni al sistema e mantenendo i carichi al di sotto dei limiti di progetto;

- gli aerogeneratori di grande taglia del tipo previsto in progetto, in considerazione anche del loro elevato valore commerciale, sono oggetto di programmi di manutenzione molto accurati che per quanto riguarda le pale è atto a verificare l'esistenza di piccole fratture, di cui se accertata la pericolosità determinano interventi di manutenzione ordinaria (riparazioni) o straordinaria (sostituzione del pezzo);

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



*Figura 2 - Estremità della pala danneggiata da fulminazione atmosferica*

## 2. GITTATA TEORICA

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

<b>PHEEDRA Srl</b> Servizi di Ingegneria Integrata Via Lago di Nemi, 90 74121 – Taranto (Italy) Tel. +39.099.7722302 – Fax: +39.099.9870285 Email: info@pheedra.it – web: www.pheedra.it	<b>RELAZIONE SULA GITTATA MASSIMA          DEGLI ELEMENTI ROTANTI</b>	Pagina 6 di 26
---	---	----------------

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <p style="text-align: right;"><b>SIN-AMB-REL-050_00</b></p>
--	---	---

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

### Traiettoria del frammento

La traiettoria iniziale della pala/sezione di pala (lunghezza pari a 10m e a 5m) distaccata è determinata principalmente dall'angolo in corrispondenza del quale avviene il distacco e dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia. Per quanto riguarda le forze di tipo aerodinamico e relativi momenti, queste agiranno sulla pala/sezione di pala influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

### Tempo di volo

Il tempo di volo generalmente è determinato:

- dalla componente verticale della velocità iniziale posseduta dalla pala/sezione di pala immediatamente dopo il distacco, in corrispondenza del suo punto baricentrico;
- dalla posizione rispetto al suolo;
- dall'accelerazione verticale;
- dalle forze di attrito agenti sulla pala/sezione di pala stessa. Il tempo di volo che si deduce da tali considerazioni è utilizzato successivamente per il calcolo della distanza.

### Distanza percorsa

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

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

Sarà preso in considerazione il calcolo della gittata, tramite foglio di calcolo interno, modellizzando, con opportune semplificazioni, il moto della pala o di un frammento di pala (in seguito indicato genericamente come "corpo") nell'aria considerando l'attrito viscoso prodotto su di esso durante la caduta.

Tutte le approssimazioni e semplificazioni proposte sono a vantaggio di sicurezza, ovvero producono risultati con approssimazione in eccesso della gittata massima in caso di rottura di elementi rotanti, poiché il calcolo sarà fondato su un modello balistico.

<b>PHEEDRA Srl</b> Servizi di Ingegneria Integrata Via Lago di Nemi, 90 74121 – Taranto (Italy) Tel. +39.099.7722302 – Fax: +39.099.9870285 Email: info@pheedra.it – web: www.pheedra.it	<p style="text-align: center;"><b>RELAZIONE SULA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI</b></p>	<p style="text-align: right;">Pagina 7 di 26</p>
---	---	--

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <p style="text-align: right;"><b>SIN-AMB-REL-050_00</b></p>
--	---	---

La determinazione dell'equazione del moto nel caso di un distacco di un corpo dal rotore in movimento è molto complessa. È evidente però che si tratta di un moto rotazionale complesso in quanto il corpo, quando inizierà il suo moto libero, continuerà anche a ruotare per l'ineluttabile legge fisica di conservazione della quantità di moto. Quindi nel moto libero (dopo il distacco) una parte dell'energia cinetica posseduta dal corpo verrà dissipata nel moto rotazionale che finirà per generare turbolenze. Di queste dissipazioni non si terrà conto nel calcolo che pertanto sarà prudenziale.

Una volta che il corpo si sarà distaccato le forze inerziali agenti saranno la forza di gravità e le forze viscosse dovute alla resistenza prodotta dall'aria. La velocità di rotazione al momento del distacco, presa in considerazione per il calcolo, è quella massima indicata dal costruttore. È evidente che i sofisticati sistemi di controllo non permetterebbero al rotore dell'aerogeneratore di ruotare ad una velocità maggiore di quelle indicate nelle specifiche tecniche.

Le assunzioni del modello sono:

- Si fa riferimento al baricentro del corpo (sulla base di forma e dimensione opportunamente ipotizzate) e si applicano ad esso le equazioni del moto;
- Si assume come velocità iniziale  $V_0$  il vettore applicato nel baricentro di cui al punto precedente al momento del distacco, avente come modulo la velocità tangenziale corrispondente alla massima velocità angolare di esercizio per un raggio pari alla distanza del baricentro dal centro di rotazione e come direzione quella della tangente nello stesso baricentro al moto circolare da esso mantenuto fino al momento del distacco;
- Si determina l'angolo  $\alpha_0$  per il quale la gittata è massima. La definizione di questo valore avviene per tentativi successivi, e dipende essenzialmente dalla geometria del sistema (altezza torre tubolare, diametro rotore, dimensioni della pala o del frammento) e dalla velocità di rotazione al momento del distacco;
- Si tiene conto, nel volo e nella traiettoria del corpo, della spinta generata dal vento in direzione ortogonale al piano del rotore che per convenzione porremo come il piano XZ e che tenderà a spostare il corpo stesso dal piano di rotazione XZ del rotore. La velocità di spinta del vento considerata è quella massima a cui funziona l'aerogeneratore (cut off);
- Si ipotizza la temperatura ambientale di 40°C, che minimizza alle condizioni d'esercizio la densità atmosferica e quindi l'attrito viscoso.

Il modulo della forza di attrito agente sulla pala (o sul frammento) in moto libero dopo il distacco è dato dalla formula.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}^2$$

<b>PHEEDRA Srl</b> Servizi di Ingegneria Integrata Via Lago di Nemi, 90 74121 - Taranto (Italy) Tel. +39.099.7722302 - Fax: +39.099.9870285 Email: info@pheedra.it - web: www.pheedra.it	<b>RELAZIONE SULA GITTATA MASSIMA          DEGLI ELEMENTI ROTANTI</b>	Pagina 8 di 26
---	---	----------------

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <p style="text-align: right;"><b>SIN-AMB-REL-050_00</b></p>
--	---	---

Dove:

- $\rho_{aria}$  è la densità dell'aria che cambia in relazione alla quota altimetrica del sito di installazione degli aerogeneratori ma anche in base alle dimensioni e quindi massime altezze raggiunte dal sistema torre tubolare + rotore;
- $C_d$  è il coefficiente di attrito ampiamente dipendente dalle caratteristiche geometriche della pala. Sulla base di dati riportati in letteratura tale valore è stato assunto pari a 1;
- $A$  è la superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria;
- $V_{xz}$  è il modulo della proiezione del vettore velocità del corpo sul piano XZ misurata con riferimento al baricentro del corpo.

I moto libero di un corpo di massa nota  $M$  sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto, quindi, dalle seguenti equazioni:

$$a_x = d^2x/dt^2 = -1/M \times F_D \times \cos\alpha$$

$$a_y = d^2y/dt^2 = 1/2 \rho_{aria} \times C_d \times A \times (w - V_y)^2 / M$$

$$a_z = d^2z/dt^2 = -1/M \times (F_D \times \sin\alpha + M \times g)$$

$$F_D = 1/2 \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}^2$$

Dove:

- $\alpha$  rappresenta l'arcotangente del rapporto  $V_z / V_x$  e cambia da istante a istante durante il moto libero di caduta;
- $w$  è il modulo della velocità del vento, supposta ortogonale al piano XZ e costante per tutta la durata del moto;
- $V_y$  è il modulo della componente della velocità del corpo avente la stessa direzione del vento;
- $g$  è l'accelerazione di gravità.

Le condizioni al contorno indipendenti sono:

- Temperatura ambiente e velocità del vento, impostate nei valori estremi di esercizio come precedentemente esposto;
- Altezza della torre, quota s.l.m. delle sue fondazioni ed eventuale dislivello del territorio circostante;
- Massa  $M$ , area efficace  $A$ , lunghezza  $L$  posizione del baricentro del corpo distaccato (posta a  $1/3$  della lunghezza nel caso dell'intera pala e a  $1/2$  nel caso di un frammento);
- $\alpha_0$  viene inizializzato al valore arbitrario di  $20^\circ$ , prossimo a valori descritti in letteratura per analoghi esperimenti;
- si pongono ascissa e ordinata del baricentro del corpo al momento del distacco  $X_0 = 0$  e  $Y_0 = 0$  (fissando l'origine del sistema di riferimento cartesiano come oltre precisato);

<b>PHEEDRA Srl</b> Servizi di Ingegneria Integrata Via Lago di Nemi, 90 74121 - Taranto (Italy) Tel. +39.099.7722302 - Fax: +39.099.9870285 Email: info@pheedra.it - web: www.pheedra.it	<b>RELAZIONE SULA GITTATA MASSIMA          DEGLI ELEMENTI ROTANTI</b>	Pagina 9 di 26
---	---	----------------

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <p style="text-align: right;"><b>SIN-AMB-REL-050_00</b></p>
--	---	---

- si pone la componente iniziale del vettore velocità in direzione del vento  $V_{y0} = 0$ , in quanto tale vettore, nel momento del distacco, è determinato dal solo movimento del rotore che è supposto ortogonale al vento stesso.

Dalle precedenti dipendono le seguenti ulteriori condizioni:

- quota di distacco  $Z_0$ ;
- densità atmosferica  $\rho_{aria}$  iniziale;
- componenti iniziali  $V_{x0}$  e  $V_{z0}$  del vettore velocità e tutte le componenti del vettore accelerazione;

La soluzione del sistema di equazioni viene determinata con il metodo di Eulero che è un metodo iterativo per la risoluzione di equazioni differenziali partendo dalle condizioni al contorno. Tale soluzione ci permetterà di definire il moto del corpo distaccato nello spazio tridimensionale rappresentato in un sistema cartesiano ortogonale XYZ, in cui:

- il piano XY rappresenta il piano orizzontale, corrispondente al livello del mare;
- il piano XZ viene fatto coincidere con il piano su cui giace il rotore (ortogonale alla direzione del vento);
- il piano YZ viene fissato, ortogonalmente agli altri due piani coordinati, facendo coincidere l'origine del sistema con la proiezione sul piano XY del baricentro del corpo nell'istante del distacco.

Con questa rappresentazione geometrica è evidente che al momento della definizione della gittata massima si dovrà tenere in conto della lunghezza del corpo in caduta, ma anche della geometria del modello.

### 3. CALCOLO GITTATA MODELLO V 172 – 7,2 MW

I calcoli relativi alla gittata degli elementi pala intera, frammento di 10 m e frammento di 5 m sono stati ottenuti utilizzando un format di calcolo interno, al caso peggiore, in funzione:

- del modello di aerogeneratore,
- dell'altezza al mozzo,
- della lunghezza del frammento,
- del valore rpm (giri a minuto),
- del dislivello pari a 50 m (caso peggiore),
- del coefficiente di attrito fluidodinamico dovuto alla forma del frammento.

<b>PHEEDRA Srl</b> Servizi di Ingegneria Integrata Via Lago di Nemi, 90 74121 – Taranto (Italy) Tel. +39.099.7722302 – Fax: +39.099.9870285 Email: info@pheedra.it – web: www.pheedra.it	<b>RELAZIONE SULA GITTATA MASSIMA          DEGLI ELEMENTI ROTANTI</b>	Pagina 10 di 26
---	---	-----------------

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <p style="text-align: right;"><b>SIN-AMB-REL-050_00</b></p>
--	---	---

### 3.1. DISTACCO DELLA PALA INTERA

Come detto il moto libero di un corpo di massa nota  $M$ , sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto, dalle seguenti equazioni:

$$a_x = d^2x/dt^2 = -1/M \times F_D \times \cos\alpha$$

$$a_y = d^2y/dt^2 = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times (w - V_y)^2 / M$$

$$a_z = d^2z/dt^2 = -1/M \times (F_D \times \sin\alpha + M \times g)$$

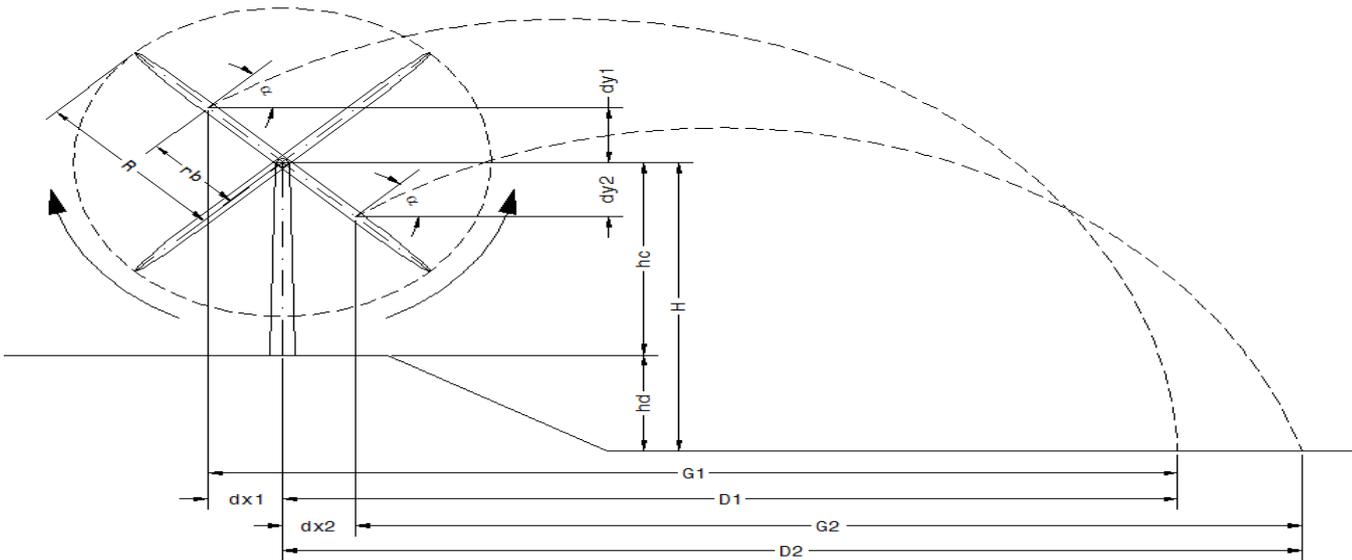
$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}^2$$

L'equazione differenziale è risolta con il metodo iterativo di Eulero, rispetto alle variabili  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Nell'istante in cui  $z$  assume il valore pari al livello previsto per l'impatto (ovvero la quota media della base torre s.l.m.), il punto di caduta del baricentro della pala è calcolato (teorema di Pitagora) dai corrispondenti valori di  $x$  e  $y$  nello stesso istante. La gittata massima sarà poi ottenuta in base alle caratteristiche geometriche dell'intero sistema, ovvero l'estensione massima del corpo rispetto al baricentro e la distanza del centro torre dall'asse  $z$  del sistema di riferimento.

Nel caso di distacco dell'intera pala i parametri assumeranno i seguenti valori:

- Altezza mozzo  $Q_t = 114$  m, diametro rotore 172 m, lunghezza pala 84 m, velocità di rotazione 9,5 g/min, che è la velocità massima consentita così come da specifiche del costruttore;
- La posizione del baricentro della pala a 1/3 della lunghezza della pala, quindi più vicina al centro di rotazione;
- $C_d = 0,103$  sulla base di dati riportati in letteratura;

Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo  $\alpha_0$  a cui avviene il distacco più gravoso, cautelativamente si sono analizzati entrambi i sensi di rotazioni.



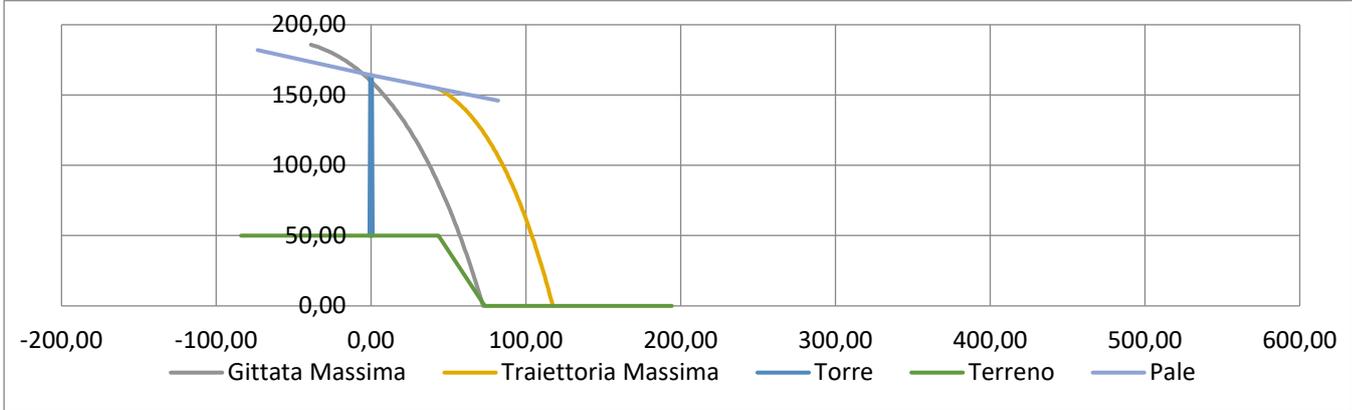
**Nel caso in esame il risultato è stato  $\alpha_0 = 192,3^\circ$  con rotazione antioraria.**

In considerazione del fatto che il terreno nell'immediato intorno degli aerogeneratori di progetto è pressoché pianeggiante, ma trovandoci zona caratterizzate da leggeri rilievi morfologici, cautelativamente si è condotta un'ulteriore ipotesi che prevede la quota di impatto punto di caduta posta più bassa della quota di base della torre. Sulla base dei valori rilevati in sito, si è fissata un'altezza media cautelativa di ulteriori 50 m.

Si è considerata la velocità massima del vento pari alla velocità di cutt-off impostata dal produttore, oltre questa velocità le pale vanno in stallo e non ruotano. La velocità del vento determina una componente del moto che è perpendicolare al piano di rotazione del rotore e pertanto a scopo precauzionale non è considerata nel calcolo balistico, dato che ne attenuerebbe la gittata.

Il valore della densità dell'aria considerato è  $\rho = 0,898$ , pari alla densità dell'aria con temperatura di  $40^\circ\text{C}$  alla quota di 200 m s.l.s. (valori limite che determinano le condizioni più sfavorevoli nel calcolo).

Nel grafico la traiettoria del moto che ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.



*Figura 3 - Traiettoria del moto della pala intera, a seguito del distacco*

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <b>SIN-AMB-REL-050_00</b>
--	---	---

Di seguito sono riportati in modo tabellati i valori della traiettoria, in senso orario ed antiorario, suddivisi per frazioni di volo.

GITTATA MASSIMA CON ATTRITO					
Angolo di rottura pari a 335,7°			Angolo di rottura pari a 192,3°		
t1	x1	y1	t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
0,00	-38,81	185,77	0,00	43,47	154,48
0,06	-37,32	185,29	0,05	44,42	153,91
0,12	-35,83	184,77	0,10	45,37	153,31
0,18	-34,36	184,21	0,16	46,31	152,69
0,25	-32,89	183,62	0,21	47,24	152,04
0,31	-31,43	183,00	0,26	48,18	151,38
0,37	-29,99	182,35	0,31	49,10	150,69
0,43	-28,55	181,67	0,36	50,02	149,97
0,49	-27,12	180,95	0,41	50,94	149,24
0,55	-25,70	180,20	0,47	51,85	148,48
0,61	-24,28	179,42	0,52	52,76	147,70
0,67	-22,88	178,60	0,57	53,66	146,90
0,74	-21,49	177,76	0,62	54,56	146,08
0,80	-20,10	176,88	0,67	55,45	145,23
0,86	-18,73	175,97	0,72	56,34	144,37
0,92	-17,36	175,03	0,78	57,22	143,48
0,98	-16,00	174,06	0,83	58,10	142,57
1,04	-14,65	173,06	0,88	58,97	141,64
1,10	-13,31	172,03	0,93	59,84	140,69
1,16	-11,97	170,97	0,98	60,70	139,71
1,23	-10,65	169,88	1,03	61,56	138,72
1,29	-9,33	168,76	1,09	62,42	137,70
1,35	-8,02	167,60	1,14	63,27	136,67
1,41	-6,72	166,42	1,19	64,11	135,61
1,47	-5,43	165,21	1,24	64,96	134,53
1,53	-4,15	163,97	1,29	65,79	133,43
1,59	-2,87	162,71	1,35	66,63	132,32
1,66	-1,60	161,41	1,40	67,45	131,18
1,72	-0,34	160,08	1,45	68,28	130,02
1,78	0,91	158,73	1,50	69,10	128,84
1,84	2,15	157,35	1,55	69,91	127,64
1,90	3,39	155,94	1,60	70,72	126,42
1,96	4,62	154,50	1,66	71,53	125,19
2,02	5,84	153,03	1,71	72,33	123,93
2,08	7,05	151,54	1,76	73,13	122,65

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <b>SIN-AMB-REL-050_00</b>
--	---	---

2,15	8,26	150,02	1,81	73,92	121,35
2,21	9,46	148,47	1,86	74,71	120,04
2,27	10,65	146,90	1,91	75,50	118,70
2,33	11,83	145,30	1,97	76,28	117,35
2,39	13,01	143,67	2,02	77,05	115,97
2,45	14,17	142,01	2,07	77,83	114,58
2,51	15,33	140,33	2,12	78,59	113,17
2,57	16,49	138,63	2,17	79,36	111,74
2,64	17,63	136,89	2,22	80,12	110,29
2,70	18,77	135,13	2,28	80,88	108,83
2,76	19,91	133,35	2,33	81,63	107,34
2,82	21,03	131,54	2,38	82,38	105,84
2,88	22,15	129,70	2,43	83,12	104,32
2,94	23,26	127,84	2,48	83,86	102,78
3,00	24,36	125,96	2,54	84,60	101,22
3,07	25,46	124,05	2,59	85,33	99,64
3,13	26,55	122,11	2,64	86,06	98,05
3,19	27,63	120,15	2,69	86,78	96,44
3,25	28,71	118,17	2,74	87,50	94,81
3,31	29,78	116,16	2,79	88,22	93,16
3,37	30,84	114,13	2,85	88,94	91,50
3,43	31,89	112,07	2,90	89,64	89,82
3,49	32,94	109,99	2,95	90,35	88,12
3,56	33,99	107,88	3,00	91,05	86,41
3,62	35,02	105,76	3,05	91,75	84,67
3,68	36,05	103,60	3,10	92,45	82,92
3,74	37,07	101,43	3,16	93,14	81,16
3,80	38,09	99,23	3,21	93,82	79,37
3,86	39,10	97,01	3,26	94,51	77,57
3,92	40,10	94,77	3,31	95,19	75,76
3,98	41,10	92,50	3,36	95,86	73,92
4,05	42,09	90,22	3,41	96,54	72,07
4,11	43,08	87,91	3,47	97,20	70,21
4,17	44,06	85,57	3,52	97,87	68,33
4,23	45,03	83,22	3,57	98,53	66,43
4,29	46,00	80,84	3,62	99,19	64,51
4,35	46,96	78,44	3,67	99,85	62,58
4,41	47,91	76,02	3,73	100,50	60,64
4,48	48,86	73,58	3,78	101,15	58,67
4,54	49,80	71,12	3,83	101,79	56,70
4,60	50,74	68,63	3,88	102,43	54,70
4,66	51,67	66,13	3,93	103,07	52,69

4,72	52,59	63,60	3,98	103,70	50,67
4,78	53,51	61,06	4,04	104,33	48,63
4,84	54,43	58,49	4,09	104,96	46,57
4,90	55,33	55,90	4,14	105,59	44,50
4,97	56,23	53,29	4,19	106,21	42,42
5,03	57,13	50,66	4,24	106,83	40,31
5,09	58,02	48,01	4,29	107,44	38,20
5,15	58,91	45,34	4,35	108,05	36,07
5,21	59,78	42,65	4,40	108,66	33,92
5,27	60,66	39,94	4,45	109,26	31,76
5,33	61,53	37,21	4,50	109,86	29,58
5,39	62,39	34,47	4,55	110,46	27,39
5,46	63,25	31,70	4,60	111,06	25,19
5,52	64,10	28,91	4,66	111,65	22,97
5,58	64,94	26,10	4,71	112,24	20,74
5,64	65,79	23,28	4,76	112,82	18,49
5,70	66,62	20,43	4,81	113,41	16,23
5,76	67,45	17,57	4,86	113,99	13,95
5,82	68,28	14,69	4,92	114,56	11,66
5,88	69,10	11,79	4,97	115,14	9,36
5,95	69,91	8,87	5,02	115,71	7,04
6,01	70,72	5,93	5,07	116,27	4,71
6,07	71,53	2,97	5,12	116,84	2,36
6,13	72,33	0,00	5,17	117,40	0,00

Il valore della distanza ( $X_{caduta} - X_{torre}$ ), ottenuto dal calcolo è pari a 156,90 m.

Il tempo di permanenza in volo massimo è di 6,13 secondi circa.

**Il valore della gittata massima, considerando la lunghezza della pala ( $2/3L$ ) è  $G_{max} = 72,33$  m.**

### 3.2. ROTTURA DEL FRAMMENTO CON LUNGHEZZA PARI A 10 M

Nel caso in cui il frammento di pala che subisce il distacco sia di lunghezza pari a 10 m, i parametri fisici e geometrici che sia assumeranno saranno i seguenti:

- Altezza mozzo  $Q_t = 114$  m, diametro rotore 172 m, lunghezza pala 84 m, velocità di rotazione 9,5 g/min, che è la velocità massima consentita così come da specifiche del costruttore;
- La posizione del baricentro della pala a  $1/3$  della lunghezza della pala, quindi più vicina al centro di rotazione;
- $C_d = 0,103$  sulla base di dati riportati in letteratura;

Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo  $\alpha_0$  a cui avviene il distacco più gravoso, cautelativamente si sono analizzati entrambi i sensi di rotazioni.

**Nel caso in esame il risultato è stato  $\alpha_0 = 216,8^\circ$ .**

In considerazione del fatto che il terreno nell'immediato intorno degli aerogeneratori di progetto è pressoché pianeggiante, ma trovandoci zona caratterizzate da leggeri rilievi morfologici, cautelativamente si è condotta una ulteriore ipotesi che prevede la quota di impatto punto di caduta posta più bassa della quota di base della torre. Sulla base dei valori rilevati in sito, si è fissata un' altezza media cautelativa di ulteriori 50 m.

Si è considerata la velocità massima del vento pari alla velocità di cutt-off impostata dal produttore, oltre questa velocità le pale vanno in stallo e non ruotano. La velocità del vento determina una componente del moto che è perpendicolare al piano di rotazione del rotore e pertanto a scopo precauzionale non è considerata nel calcolo balistico, dato che ne attenuerebbe la gittata.

Il valore della densità dell'aria considerato è  $\rho = 0,898$ , pari alla densità dell'aria con temperatura di  $40^\circ\text{C}$  alla quota di 200 m s.l.m. (valori limite che determinano le condizioni più sfavorevoli nel calcolo).

Nel grafico la traiettoria del moto che ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

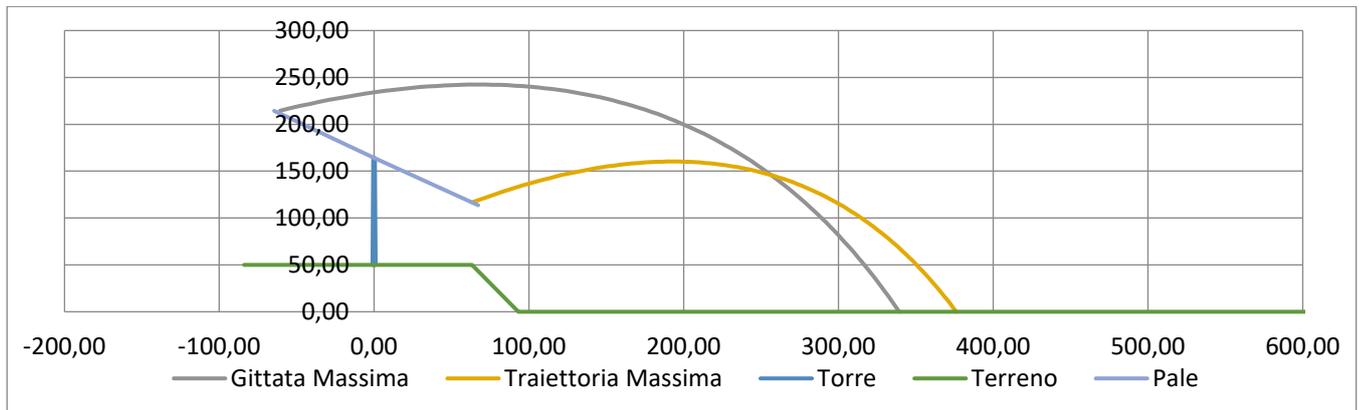


Figura 4 - Traiettoria del moto di un frammento di 10 m, a seguito di rottura

Di seguito sono riportati in modo tabellati i valori della traiettoria, in senso orario ed antiorario, suddivisi per frazioni di volo.

Il valore della distanza ( $X_{\text{caduta}} - X_{\text{torre}}$ ), ottenuto dal calcolo è pari a 381,17 m.

Il tempo di permanenza in volo è di 10,27 secondi circa.

**Il valore della gittata massima, considerando metà lunghezza del frammento ( $1/2L$ ) è  $G_{\text{max}} = 339,25$  m.**

GITTATA MASSIMA CON ATTRITO					
Angolo di rottura pari a $325,2^\circ$			Angolo di rottura pari a $216,8^\circ$		
t1	x1	y1	t2	x2	y2

[s]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
0,00	-60,68	214,58	0,00	63,24	116,65
0,10	-54,24	217,11	0,09	68,04	119,56
0,21	-47,87	219,52	0,18	72,81	122,36
0,31	-41,57	221,79	0,28	77,53	125,05
0,41	-35,33	223,94	0,37	82,20	127,64
0,51	-29,16	225,96	0,46	86,83	130,11
0,62	-23,05	227,86	0,55	91,42	132,49
0,72	-17,00	229,64	0,64	95,97	134,76
0,82	-11,02	231,29	0,73	100,47	136,92
0,92	-5,10	232,82	0,83	104,93	138,98
1,03	0,75	234,24	0,92	109,35	140,94
1,13	6,55	235,53	1,01	113,72	142,81
1,23	12,28	236,71	1,10	118,06	144,57
1,34	17,95	237,78	1,19	122,35	146,23
1,44	23,57	238,73	1,28	126,61	147,79
1,54	29,12	239,57	1,38	130,82	149,26
1,64	34,62	240,29	1,47	135,00	150,63
1,75	40,06	240,91	1,56	139,13	151,91
1,85	45,44	241,41	1,65	143,23	153,09
1,95	50,77	241,81	1,74	147,29	154,18
2,05	56,04	242,10	1,83	151,31	155,18
2,16	61,25	242,28	1,93	155,29	156,08
2,26	66,41	242,36	2,02	159,24	156,90
2,36	71,52	242,34	2,11	163,15	157,62
2,47	76,57	242,21	2,20	167,02	158,26
2,57	81,57	241,98	2,29	170,85	158,81
2,67	86,51	241,65	2,39	174,65	159,27
2,77	91,41	241,22	2,48	178,42	159,64
2,88	96,25	240,69	2,57	182,15	159,93
2,98	101,04	240,07	2,66	185,84	160,14
3,08	105,79	239,35	2,75	189,50	160,26
3,18	110,48	238,53	2,84	193,13	160,29
3,29	115,12	237,62	2,94	196,72	160,25
3,39	119,72	236,61	3,03	200,27	160,12
3,49	124,26	235,51	3,12	203,80	159,91
3,60	128,76	234,32	3,21	207,29	159,62
3,70	133,21	233,05	3,30	210,75	159,25
3,80	137,62	231,68	3,39	214,17	158,80
3,90	141,97	230,22	3,49	217,57	158,28
4,01	146,29	228,67	3,58	220,93	157,68
4,11	150,55	227,04	3,67	224,26	157,00

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <b>SIN-AMB-REL-050_00</b>
--	---	---

4,21	154,78	225,32	3,76	227,56	156,24
4,32	158,95	223,52	3,85	230,83	155,41
4,42	163,09	221,63	3,94	234,06	154,51
4,52	167,18	219,66	4,04	237,27	153,53
4,62	171,23	217,61	4,13	240,45	152,48
4,73	175,23	215,47	4,22	243,59	151,36
4,83	179,20	213,26	4,31	246,71	150,16
4,93	183,12	210,97	4,40	249,80	148,90
5,03	187,00	208,59	4,49	252,86	147,56
5,14	190,84	206,14	4,59	255,89	146,15
5,24	194,64	203,61	4,68	258,89	144,68
5,34	198,40	201,01	4,77	261,87	143,14
5,45	202,12	198,33	4,86	264,81	141,53
5,55	205,80	195,57	4,95	267,73	139,85
5,65	209,44	192,74	5,05	270,62	138,10
5,75	213,04	189,84	5,14	273,49	136,29
5,86	216,61	186,86	5,23	276,33	134,42
5,96	220,14	183,81	5,32	279,14	132,48
6,06	223,63	180,70	5,41	281,92	130,48
6,16	227,09	177,51	5,50	284,68	128,41
6,27	230,51	174,25	5,60	287,41	126,28
6,37	233,89	170,92	5,69	290,12	124,09
6,47	237,24	167,53	5,78	292,80	121,83
6,58	240,55	164,06	5,87	295,46	119,52
6,68	243,83	160,53	5,96	298,09	117,14
6,78	247,07	156,94	6,05	300,69	114,71
6,88	250,28	153,28	6,15	303,28	112,21
6,99	253,46	149,55	6,24	305,83	109,66
7,09	256,60	145,77	6,33	308,37	107,05
7,19	259,71	141,91	6,42	310,88	104,38
7,29	262,78	138,00	6,51	313,37	101,65
7,40	265,83	134,02	6,60	315,83	98,87
7,50	268,84	129,98	6,70	318,27	96,03
7,60	271,82	125,89	6,79	320,69	93,14
7,71	274,77	121,73	6,88	323,08	90,19
7,81	277,69	117,51	6,97	325,45	87,19
7,91	280,58	113,23	7,06	327,80	84,13
8,01	283,44	108,90	7,16	330,13	81,02
8,12	286,26	104,51	7,25	332,44	77,85
8,22	289,06	100,06	7,34	334,72	74,63
8,32	291,83	95,55	7,43	336,99	71,37
8,42	294,57	90,99	7,52	339,23	68,05

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <b>SIN-AMB-REL-050_00</b>
--	---	---

8,53	297,28	86,37	7,61	341,45	64,67
8,63	299,96	81,70	7,71	343,65	61,25
8,73	302,62	76,98	7,80	345,83	57,78
8,84	305,24	72,20	7,89	347,99	54,26
8,94	307,84	67,37	7,98	350,13	50,69
9,04	310,41	62,49	8,07	352,25	47,07
9,14	312,96	57,55	8,16	354,35	43,40
9,25	315,48	52,56	8,26	356,42	39,69
9,35	317,97	47,53	8,35	358,48	35,92
9,45	320,43	42,44	8,44	360,52	32,11
9,55	322,87	37,30	8,53	362,55	28,26
9,66	325,29	32,12	8,62	364,55	24,35
9,76	327,67	26,88	8,71	366,53	20,41
9,86	330,04	21,60	8,81	368,50	16,41
9,97	332,38	16,27	8,90	370,44	12,38
10,07	334,69	10,89	8,99	372,37	8,29
10,17	336,98	5,47	9,08	374,28	4,17
10,27	339,25	0,00	9,17	376,17	0,00

### 3.3. ROTTURA DEL FRAMMENTO CON LUNGHEZZA PARI A 5 M

Nel caso in cui il frammento di pala che subisce il distacco sia di lunghezza pari a 5 m, i parametri fisici e geometrici che si assumeranno saranno i seguenti:

- Altezza mozzo  $Q_t = 114$  m, diametro rotore 172 m, lunghezza pala 84 m, velocità di rotazione 9,5 g/min, che è la velocità massima consentita così come da specifiche del costruttore;
- La posizione del baricentro della pala a 1/3 della lunghezza della pala, quindi più vicina al centro di rotazione;
- $C_d = 0,103$  sulla base di dati riportati in letteratura;

Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo  $\alpha_0$  a cui avviene il distacco più gravoso, cautelativamente si sono analizzati entrambi i sensi di rotazioni.

**Nel caso in esame il risultato è stato  $\alpha_0 = 217,7^\circ$ .**

In considerazione del fatto che il terreno nell'immediato intorno degli aerogeneratori di progetto è pressoché pianeggiante, ma trovandoci zona caratterizzate da leggeri rilievi morfologici, cautelativamente si è condotta una ulteriore ipotesi che prevede la quota di impatto punto di caduta posta più bassa della quota di base della torre. Sulla base dei valori rilevati in sito, si è fissata un'altezza media cautelativa di ulteriori 50 m.

Si è considerata la velocità massima del vento pari alla velocità di cutt-off impostata dal produttore, oltre questa velocità le pale vanno in stallo e non ruotano. La velocità del vento determina una componente del moto che è perpendicolare al piano di rotazione del rotore e pertanto a scopo precauzionale non è considerata nel calcolo balistico, dato che ne attenuerebbe la gittata.

Il valore della densità dell'aria considerato è  $\rho = 0,898$ , pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 200 m s.l.m. (valori limite che determinano le condizioni più sfavorevoli nel calcolo).

Nel grafico la traiettoria del moto che ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

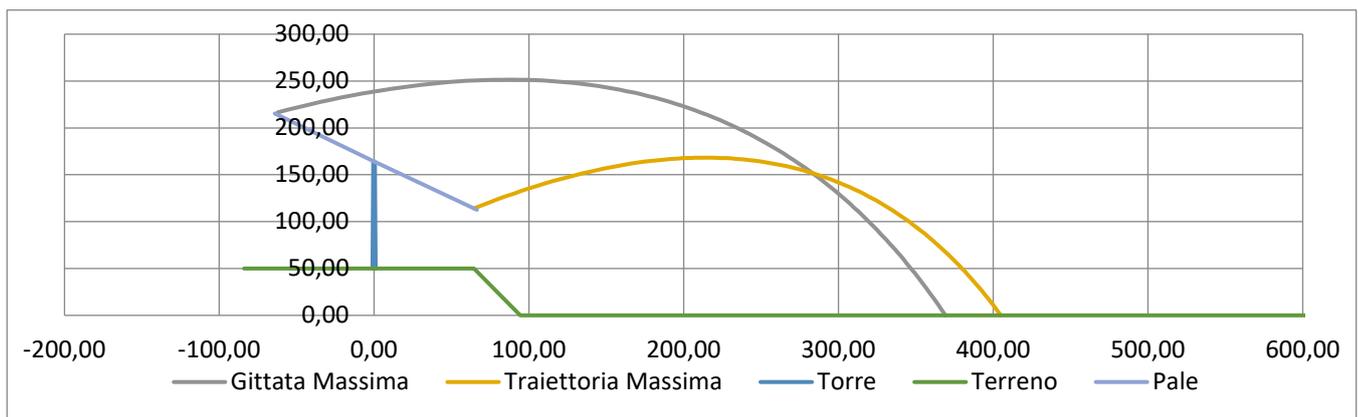


Figura 5 - Traiettoria del moto di un frammento di 5 m, a seguito di rottura

Di seguito sono riportati in modo tabellati i valori della traiettoria, in senso orario ed antiorario, suddivisi per frazioni di volo.

Il valore della distanza ( $X_{caduta} - X_{torre}$ ), ottenuto dal calcolo è pari a 407,52 m.

Il tempo di permanenza in volo è di 10,70 secondi circa.

**Il valore della gittata massima, considerando metà lunghezza del frammento (1/2L) è  $G_{max} = 369,21$  m.**

GITTATA MASSIMA CON ATTRITO					
Angolo di rottura pari a 324,8°			Angolo di rottura pari a 217,7°		
t1	x1	y1	t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
0,00	-62,21	216,65	0,00	64,48	114,15
0,11	-55,14	219,63	0,10	69,82	117,60
0,21	-48,15	222,47	0,19	75,11	120,93
0,32	-41,23	225,17	0,29	80,34	124,13
0,43	-34,38	227,73	0,39	85,53	127,20
0,54	-27,62	230,14	0,48	90,66	130,16
0,64	-20,92	232,42	0,58	95,74	133,00
0,75	-14,30	234,56	0,68	100,78	135,72
0,86	-7,75	236,57	0,77	105,76	138,32

0,96	-1,28	238,44	0,87	110,69	140,80
1,07	5,13	240,18	0,97	115,58	143,17
1,18	11,47	241,79	1,06	120,41	145,42
1,28	17,73	243,27	1,16	125,20	147,56
1,39	23,93	244,63	1,25	129,95	149,59
1,50	30,06	245,85	1,35	134,64	151,51
1,61	36,13	246,95	1,45	139,29	153,32
1,71	42,12	247,93	1,54	143,89	155,02
1,82	48,06	248,78	1,64	148,45	156,61
1,93	53,92	249,52	1,74	152,96	158,09
2,03	59,73	250,13	1,83	157,43	159,47
2,14	65,46	250,63	1,93	161,85	160,75
2,25	71,14	251,00	2,03	166,24	161,92
2,35	76,76	251,27	2,12	170,57	162,99
2,46	82,31	251,41	2,22	174,87	163,95
2,57	87,80	251,45	2,32	179,12	164,82
2,68	93,23	251,37	2,41	183,33	165,59
2,78	98,61	251,18	2,51	187,50	166,26
2,89	103,92	250,88	2,61	191,63	166,83
3,00	109,18	250,47	2,70	195,71	167,30
3,10	114,38	249,96	2,80	199,76	167,68
3,21	119,52	249,34	2,90	203,77	167,97
3,32	124,60	248,61	2,99	207,73	168,16
3,43	129,63	247,78	3,09	211,66	168,26
3,53	134,61	246,85	3,18	215,55	168,26
3,64	139,53	245,82	3,28	219,40	168,18
3,75	144,40	244,68	3,38	223,21	168,00
3,85	149,21	243,45	3,47	226,99	167,74
3,96	153,97	242,12	3,57	230,73	167,39
4,07	158,68	240,69	3,67	234,43	166,95
4,17	163,34	239,16	3,76	238,09	166,42
4,28	167,94	237,54	3,86	241,72	165,81
4,39	172,50	235,83	3,96	245,31	165,11
4,50	177,01	234,02	4,05	248,87	164,33
4,60	181,46	232,12	4,15	252,39	163,47
4,71	185,87	230,13	4,25	255,88	162,52
4,82	190,23	228,05	4,34	259,33	161,49
4,92	194,55	225,88	4,44	262,75	160,38
5,03	198,81	223,62	4,54	266,14	159,19
5,14	203,03	221,28	4,63	269,49	157,92
5,24	207,20	218,85	4,73	272,81	156,58
5,35	211,33	216,33	4,83	276,10	155,15

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <b>SIN-AMB-REL-050_00</b>
--	---	---

5,46	215,41	213,73	4,92	279,35	153,65
5,57	219,45	211,05	5,02	282,57	152,07
5,67	223,44	208,28	5,12	285,76	150,42
5,78	227,39	205,44	5,21	288,92	148,69
5,89	231,30	202,51	5,31	292,05	146,89
5,99	235,16	199,50	5,40	295,14	145,02
6,10	238,98	196,41	5,50	298,21	143,07
6,21	242,76	193,25	5,60	301,24	141,05
6,32	246,50	190,01	5,69	304,25	138,96
6,42	250,20	186,69	5,79	307,23	136,80
6,53	253,86	183,29	5,89	310,17	134,57
6,64	257,47	179,82	5,98	313,09	132,28
6,74	261,05	176,28	6,08	315,98	129,91
6,85	264,59	172,67	6,18	318,84	127,48
6,96	268,09	168,98	6,27	321,67	124,97
7,06	271,55	165,22	6,37	324,48	122,41
7,17	274,97	161,39	6,47	327,25	119,77
7,28	278,36	157,49	6,56	330,00	117,08
7,39	281,71	153,52	6,66	332,72	114,31
7,49	285,02	149,48	6,76	335,42	111,49
7,60	288,30	145,38	6,85	338,09	108,60
7,71	291,54	141,21	6,95	340,73	105,65
7,81	294,74	136,97	7,05	343,35	102,63
7,92	297,91	132,67	7,14	345,94	99,56
8,03	301,05	128,30	7,24	348,50	96,42
8,13	304,15	123,87	7,33	351,04	93,23
8,24	307,22	119,37	7,43	353,56	89,97
8,35	310,25	114,81	7,53	356,05	86,66
8,46	313,25	110,19	7,62	358,51	83,29
8,56	316,22	105,51	7,72	360,95	79,86
8,67	319,16	100,77	7,82	363,37	76,37
8,78	322,06	95,97	7,91	365,76	72,83
8,88	324,93	91,11	8,01	368,13	69,23
8,99	327,77	86,19	8,11	370,48	65,58
9,10	330,58	81,21	8,20	372,80	61,87
9,20	333,36	76,17	8,30	375,10	58,10
9,31	336,11	71,08	8,40	377,38	54,29
9,42	338,82	65,93	8,49	379,63	50,42
9,53	341,51	60,73	8,59	381,86	46,49
9,63	344,17	55,47	8,69	384,08	42,52
9,74	346,80	50,16	8,78	386,26	38,49
9,85	349,40	44,79	8,88	388,43	34,41

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <p style="text-align: right;"><b>SIN-AMB-REL-050_00</b></p>
--	---	---

9,95	351,97	39,37	8,98	390,58	30,28
10,06	354,52	33,90	9,07	392,70	26,10
10,17	357,03	28,38	9,17	394,81	21,87
10,28	359,52	22,80	9,27	396,89	17,60
10,38	361,99	17,18	9,36	398,95	13,27
10,49	364,42	11,50	9,46	400,99	8,89
10,60	366,83	5,78	9,55	403,01	4,47
10,70	369,21	0,00	9,65	405,02	0,00

### 3.4. VERIFICA DELLA GITTATA RISPETTO I RECETTORI E LE STRADE

Come mostrato nella figura seguente è stata condotta una analisi che mette in relazione la gittata, prendendo come estremi quella relativa la pala intera e il frammento da 5 m, con i recettori sensibili e le strade di interesse quali statali, regionali e provinciali.

Nel merito, come recettori sono stati considerati quei recettori accatastati come classe A, quindi recettori abitativi, mentre per le strade di interesse, data l'abbondante distanza da strade di competenza statale e regionale, il campo di intervento è circoscritto alle sole strade provinciali e locali.

Dalla figura si evince che considerando la gittata nel caso peggiore, ovvero con frammento di 5 m, tutti i recettori di classe A censiti sono ben lontani dal teorico campo di azione.

Per quanto concerne invece le strade considerando quelle ad alta densità di traffico, anch'esse sono lontane dal campo teorico di azione della gittata al caso peggiore.

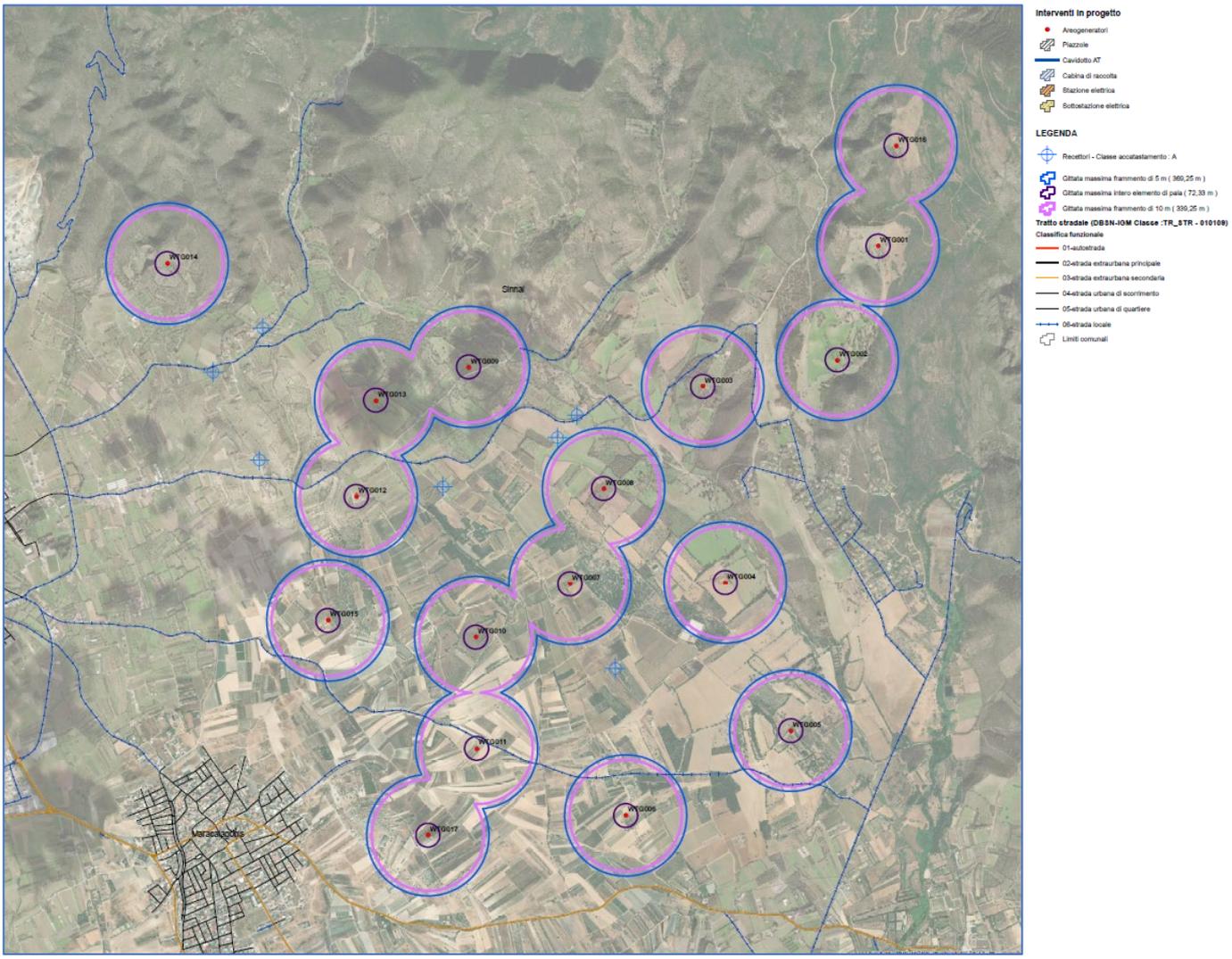


Figura 6 – distanza gittata massima con recettori e strade

**3.5. VALORI GITTATA IN CASO DI ROTTURA PER V 172 – 7,2 MW**

Come detto nei paragrafi precedenti per ciascun parametro del calcolo balistico, sono stati considerati valori ampiamente conservativi e nelle condizioni di esercizio più gravose, il valore della gittata calcolato si può considerare ampiamente conservativo, pertanto da considerarsi quale gittata massima. Il valore calcolato per la gittata massima dell'intera pala nel caso di rottura accidentale è il seguente:

$$G_{max} = 72,33 \text{ m (pala intera)}$$

$$G_{max} = 339,25 \text{ m (Frammento } L = 10 \text{ m)}$$

$$G_{max} = 369,21 \text{ m (Frammento } L = 5 \text{ m)}$$

Dai risultati è evidente che:

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <b>SIN-AMB-REL-050_00</b>
--	---	---

**Anche nel caso peggiore la gittata si mantiene al di sotto dei 400 m.**

#### 4. CONCLUSIONI

È importante rimarcare che, sulla base di accurati studi statistici su aerogeneratori di grossa taglia, la rottura di un frammento di pala è da escludere in considerazione delle caratteristiche costruttive delle pale stesse. Il distacco dell'intera pala è invece potenzialmente possibile, dovuto ad esempio, ad una cattiva manutenzione (verifica del corretto serraggio dei prigionieri che incardinano la pala al centro del rotore).

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

Il moto libero di un corpo di massa nota  $M$  sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto, dalle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned}
 a_x &= d^2x/dt^2 = -1/M \times F_D \times \cos\alpha \\
 a_y &= d^2y/dt^2 = 1/2 \rho_{aria} \times C_d \times A \times (w - V_y)^2 / M \\
 a_z &= d^2z/dt^2 = -1/M \times (F_D \times \sin\alpha + M \times g) \\
 F_D &= 1/2 \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}^2
 \end{aligned}$$

In particolare,  $F_D$  è la forza di attrito dovuta alla resistenza dell'aria sul corpo in movimento che è direttamente proporzionale al quadrato della velocità ma, dipende dalla densità dell'aria  $\rho_{aria}$ , da forma e superficie dell'elemento in movimento ( $A$ ,  $C_D$ ). Attribuendo opportuni valori ai vari coefficienti si sono risolte le equazioni differenziali, con il metodo iterativo di Eulero, rispetto alle variabili  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Da queste poi è stata calcolata la gittata sulla base di considerazioni geometriche.

Dal momento che sono stati considerati per ciascun parametro del calcolo balistico, valori ampiamente conservativi e nelle condizioni di esercizio più gravose, il valore della gittata calcolato si può considerare ampiamente conservativo, pertanto da considerarsi quale gittata massima.

Il valore calcolato per la gittata massima è il seguente:

**V 172 – 7,2 MW: nel caso peggiore la gittata si mantiene al di sotto dei 400 m.**

Dai valori riportati ai paragrafi 3.2, 3.3 e 3.4 è possibile trarre alcune conclusioni:

<b>PHEEDRA Srl</b> Servizi di Ingegneria Integrata Via Lago di Nemi, 90 74121 – Taranto (Italy) Tel. +39.099.7722302 – Fax: +39.099.9870285 Email: info@pheedra.it – web: www.pheedra.it	<b>RELAZIONE SULA GITTATA MASSIMA          DEGLI ELEMENTI ROTANTI</b>	Pagina 25 di 26
---	---	-----------------

Committente: <b>ECOWIND 6 S.r.l.</b> Via Alessandro Manzoni, 30 20121 Milano (MI)	PROGETTO PER LA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN PARCO EOLICO DELLA POTENZA DI 122,4 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI SINNAI, MARACALAGONIS, QUARTUCCIU, SETTIMO SAN PIETRO E SELARGIUS (CA)	Nome del file:  <p style="text-align: right;"><b>SIN-AMB-REL-050_00</b></p>
--	---	---

- Nel caso dell'intera pala il notevole peso incide notevolmente sulla lunghezza della traiettoria, oltre che sul tempo di volo;
- Nel caso dei frammenti, quanto più piccoli (e quindi leggeri) essi sono, tanto maggiore è il valore della gittata;
- I valori della gittata sono tutti dipendenti dall'angolo  $\alpha_0$  a cui avviene il distacco. In tutti i casi il valore dell'angolo massimo per cui si ha il valore massimo della gittata è stato definito valutando tutte le possibilità.
- È rispettata la distanza tra gli aerogeneratori ed i centri abitati, ricordando che deve essere almeno pari a 6 volte l'altezza dell'aerogeneratore comprensivo della lunghezza della pala (altezza al TIP).
- È rispettata la distanza tra gli aerogeneratori e le strade statali e provinciali in quanto, come riportato nel PEAR al paragrafo 3.2 "La distanza di una turbina da una strada provinciale o statale o da una linea ferroviaria deve essere superiore alla somma dell'altezza dell'aerogeneratore al mozzo e del raggio del rotore, più un ulteriore 10%".