



REGIONE  
SARDEGNA



PROVINCIA  
DI NUORO



COMUNE DI  
ORUNE



COMUNE DI  
NUORO

## PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO DA 46,8 MW NEL COMUNE DI ORUNE (NU) CON OPERE DI CONNESSIONE NEL COMUNE DI NUORO (NU)



Proponente



**LOTO RINNOVABILI S.R.L.**

Largo Augusto n.3  
20122 Milano  
pec:lotorinnovabili@legalmail.it

Progettazione



Viale Michelangelo, 71  
80129 Napoli  
TEL.081 579 7998  
mail: tecnico@inse srl

Amm. Francesco Di Maso  
Ing. Nicola Galdiero  
Ing. Pasquale Esposito

Collaboratori:  
Dott. Geol. L. Sanciu  
Dott. F. Mascia  
Dott. Archeol. M. Tatti  
Dott. M. Medda  
Arch. C. Gaudiero  
Ing. F. Quarto  
Ing. M. Ciano  
Studio Rinnovabili Srl  
Ing. R. D'Onofrio

Elaborato

Nome Elaborato:

**STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI**

00	Giugno 2023	PRIMA EMISSIONE	INSE Srl	INSE Srl	Loto Rinnovabili s.r.l.
Rev.	Data	Oggetto della revisione	Elaborazione	Verifica	Approvazione

Scala: -:-

Formato: **A4**

Codice Pratica

**S289**

Codice Elaborato

**AS289-SI12-R**

## Sommario

1	PREMESSA.....	2
1.1	DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO.....	2
2	STUDIO DEL MOTO DEL PROIETTILE: DISTACCO DELL'INTERA PALA.....	4
2.1	IPOSTESI DI CALCOLO .....	5
2.2	EQUAZIONI DELLA CINEMATICA.....	6
2.3	VELOCITA' PERIFERICA.....	8
2.4	GITTATA PALA INTERA .....	9
2.5	GITTATA FRAMMENTI.....	10
2.6	ANALISI DEI RICETTORI .....	12
3	CONCLUSIONI .....	14

 <b>Loto Rinnovabili Srl</b> Largo Augusto n.3 20122 Milano pec:lotorinnovabili@legalmail.it	<b>STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI</b>		Cod. AS289-SI12-R
	Data Giugno 2023	Rev. 00	

## 1 PREMESSA

La società Loto Rinnovabili Srl è proponente di un progetto di produzione di energia rinnovabile da fonte eolica ubicato nel comune di Orune in provincia di Nuoro con opere di connessione nel comune di Nuoro.

L'ipotesi progettuale prevede l'installazione di n.9 aerogeneratori della potenza nominale di 5,2 MW per una potenza complessiva di impianto pari a 46,80 MW. Gli aerogeneratori saranno collegati tra loro attraverso cavidotto interrato in MT a 30 kV che collegheranno il parco eolico ad una cabina di smistamento e sezionamento 30 kV e alla stazione di trasformazione di 30/150 kV, localizzata nel Comune di Nuoro (NU).il collegamento alla SE di smistamento 150 kV di Terna sita nell'area industriale di Nuoro "Prato Sardo" avverrà mediante cavidotto interrato in AT a 150 kV.

Il progetto è assoggettato a Valutazione di Impatto Ambientale di competenza Ministeriale, poiché la potenza totale dell'impianto è maggiore di 30 MW.

L'obiettivo della presente relazione è la determinazione della gittata massima della pala e di alcuni suoi frammenti, al fine di analizzare impatti su possibili recettori effettuando un'analisi cautelativa che consenta di operare a vantaggio di sicurezza.

### 1.1 DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO

L'ambito territoriale considerato si trova nella porzione Nord-Est della Regione Sardegna. I comuni interessati dal progetto sono per quanto concerne l'impianto eolico il comune di Orune (NU), mentre per quanto concerne la connessione alla RTN è il comune di Nuoro (NU), in provincia di Nuoro.

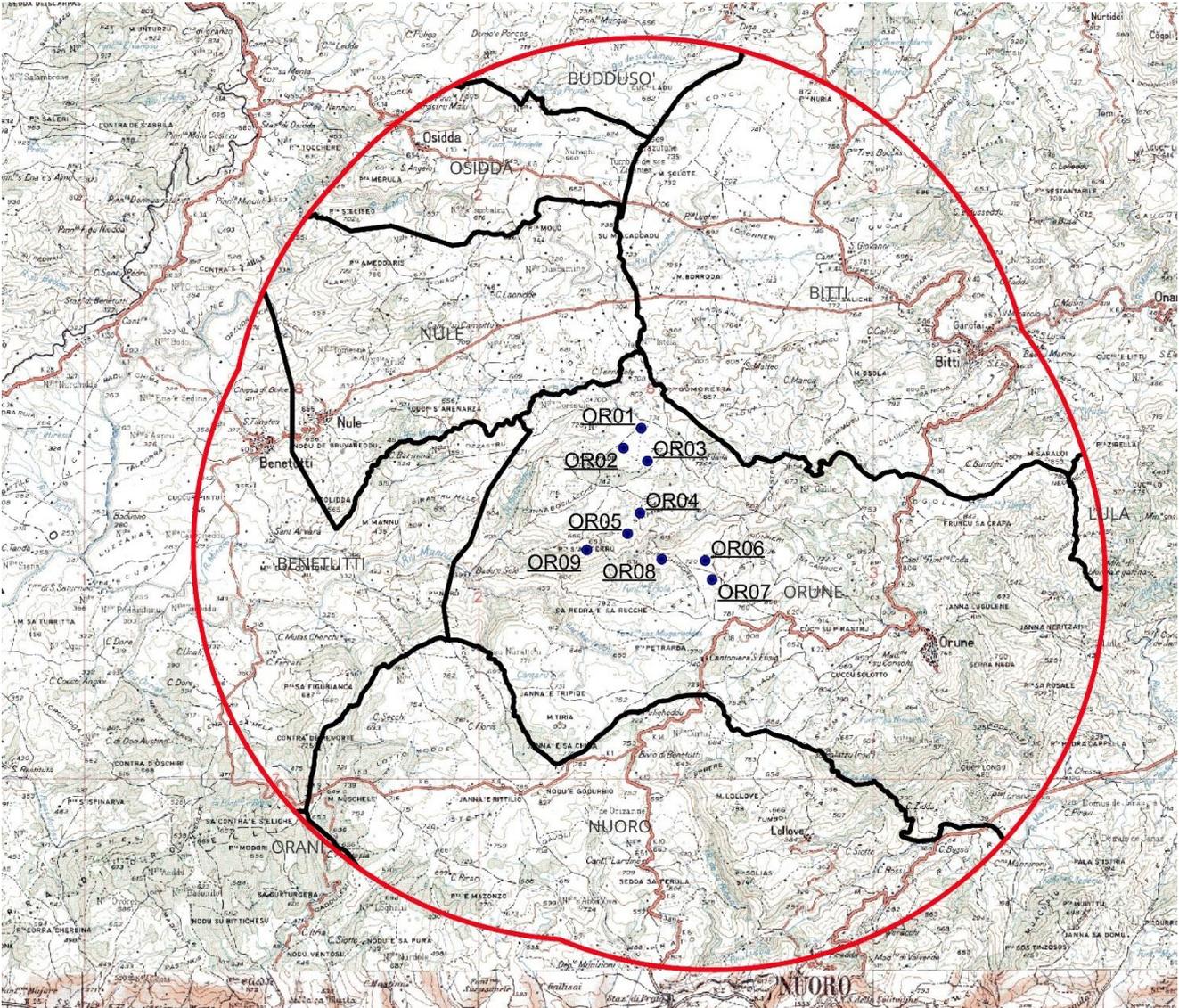


Figura 1: inquadramento degli aerogeneratori su cartografia IGM e relativa area contermina

L'area vasta, che è individuata su cartografia come l'involuppo delle distanze dagli aerogeneratori di ampiezza pari a 50 volte l'altezza massima degli aerogeneratori, è ampia circa 10 km (9975 m) e comprende invece altri Comuni, riportati in figura 1. In particolare, i comuni che ricadono nell'area contermina sono i comuni di Benetutti, Bitti, Buddusò, Lula, Nule, Nuoro, Orani, Orune e Osidda.

Il sito oggetto di intervento ricade nel Foglio IGM Serie 194 II-NO (Punta Gomoretta) scala 1:25.000 e si sviluppa tra quote comprese da 712 a 825 m s.l.m. Orune è collocata su un altipiano a circa 750 m s.l.m. mare ed il territorio è formato da altipiani con andamento collinare e attraversato da vallate destinate alla coltivazione.

Gli aerogeneratori sono localizzati alle seguenti coordinate:

ID WTG	Coordinate WGS 84 UTM32		Quote e misure				
	Long. EST (m)	Long. NORD (m)	Altitudine (m s.l.m.)	Modello WTG	Altezza mozzo (m)	Altezza TIP (m)	Altezza TIP (m s.l.m.)
OR 01	524053	4478761	821	Nordex N163	118	199.5	1020.5
OR 02	523604	4478256	825	Nordex N163	118	199.5	1024.5
OR 03	524212	4477921	813	Nordex N163	118	199.5	1012.5
OR 04	524022	4476597	751	Nordex N163	118	199.5	950.5
OR 05	523707	4476068	712	Nordex N163	118	199.5	911.5
OR 06	525675	4475376	799	Nordex N163	118	199.5	998.5
OR 07	525847	4474893	795	Nordex N163	118	199.5	994.5
OR 08	524573	4475413	764	Nordex N163	118	199.5	963.5
OR 09	522673	4475649	724	Nordex N163	118	199.5	923.5

Tabella 1: Coordinate degli aerogeneratori in sistema UTM 33-WGS 84-Fuso33

L'aerogeneratore scelto in fase progettuale è di produzione Nordex 163 da 5.2 MW, caratterizzata da:

- Rotore di 163 m di diametro;
- Altezza al mozzo di 118 m;
- Altezza totale di 199,5 m.

Le analisi urbanistiche, ambientali, acustiche e territoriali (effetto stroboscopico, gittata degli elementi rotanti, fotoinserimenti) sono state effettuate considerando la tipologia di aerogeneratore in *tabella 1*, ma in fase esecutiva potranno essere scelte macchine diverse, della stessa tipologia e con dati tecnici comparabili o migliorativi per gli impatti generati dagli aerogeneratori.

L'energia elettrica prodotta verrà convogliata prima nella cabina di smistamento utente poi nella stazione elettrica di trasformazione 30/150 kV mediante cavi interrati. Il tracciato dei cavidotti interrati è stato individuato al fine di assicurare il passaggio su strada. La configurazione delle opere connesse all'impianto è consultabile sulle cartografie dedicate allegate al progetto.

## 2 STUDIO DEL MOTO DEL PROIETTILE: DISTACCO DELL'INTERA PALA

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

Tuttavia, al fine della sicurezza, la stima della gittata massima di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico. Le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro 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 della pala mentre la stessa è 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), ed i sistemi di controllo dell'aerogeneratore riducono pressoché istantaneamente la velocità di rotazione, eliminando la possibilità che un frammento di pala si stacchi e venga proiettato verso l'alto.

Tutte le pale oggi in commercio sono, inoltre, protette dalla fulminazione diretta in accordo alla norma IEC 61400 – 24 – livello I. Considerate le caratteristiche meccaniche e costruttive della pala, si può pertanto ritenere che ha senso effettuare esclusivamente un calcolo di gittata della pala intera in quanto esiste un punto di discontinuità, l'attacco bullonato che unisce la pala al mozzo, ed esiste un'ipotesi, seppur remota, sulla possibilità di cedimento di tale attacco.

Tuttavia, per operare in condizioni di maggiore sicurezza, saranno considerati anche le rotture di alcuni frammenti della pala.

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

- Caso 1 Moto del proiettile con minore resistenza aerodinamica. Calcolo della gittata massima, in assenza di moto rotazionale intorno ad un asse qualsiasi, con ala complanare al rotore;
- Caso 2 Moto del proiettile con maggiore resistenza aerodinamica. Calcolo della gittata massima, sempre in assenza di moto rotazionale, intorno ad un asse qualsiasi, con traiettoria complanare al rotore ed ala ortogonale rispetto al piano del rotore;
- Caso 3 Calcolo della gittata massima in presenza di moti di rotazione intorno a ciascuno dei tre assi principali del frammento stesso. In caso di rottura, infatti, per il principio di conservazione del momento angolare, il generico spezzone di pala tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano e, a causa delle diverse pressioni cinetiche esercitate dal vento, tende anche a ruotare intorno a ciascuno dei due assi principali appartenenti al proprio piano.

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

Quanto appena detto è stato confermato anche dalla casa produttrice di aerogeneratori Vestas attraverso il Technical Report - Rev.8 - 23/12/2011 dal nome "Calcolo della traiettoria di una pala eolica i condizioni nominali di funzionamento". Nello studio citato, la Vestas ha infatti determinato la distanza che la pala di un aerogeneratore raggiunge, in caso di distacco dal mozzo, mentre la pala è in rotazione per otto modelli di aerogeneratori dimostrando che il primo caso (moto ideale irrotazionale) restituisce dei valori nettamente superiori al terzo caso (moto reale rotazionale complesso).

## 2.1 IPOTESI DI CALCOLO

Una volta definito il modello di calcolo, è possibile delineare le ipotesi che stanno alla base del calcolo che in seguito sarà presentato.

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo della gittata massima per distacco dell'intera pala sono le più gravose possibili in modo da giungere a risultati sicuramente cautelativi.

Per il calcolo della massima gittata si considerano le seguenti ipotesi:

- Resistenza fluidodinamica dell'aria trascurabile;
- Azione degli agenti atmosferici assente;
- Traiettoria della pala assimilabile a quella di un punto materiale coincidente col suo centro di massa

 <b>Loto Rinnovabili Srl</b> Largo Augusto n.3 20122 Milano pec:lotorinnovabili@legalmail.it	<b>STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI</b>		Cod. AS289-SI12-R
	Data Giugno 2023	Rev. 00	

- Quota della torre coincidente con la quota del punto di caduta (la differenza tra la quota di lancio e quella di impatto al suolo si ripercuote sul tempo di caduta al suolo e sulla gittata);
- Altezza del mozzo 119 m;
- Diametro del rotore 162 m;
- Lunghezza della pala 79,7 m (come riportato dalle schede tecniche della casa produttrice Nordex);
- Distanza del centro di massa dal mozzo 26,56 m. Tale distanza è stata valutata con buona approssimazione come 1/3 della lunghezza della pala;
- Velocità di rotazione 10 rpm.

Con lo studio del moto di un proiettile si intende fornire un modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati con un certo angolo di alzo, velocità costante e moto parabolico.

Il moto di un proiettile è la composizione di due moti: uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale, e uno uniformemente accelerato (con accelerazione di gravità) in direzione verticale. Ne segue che la traiettoria seguita da un corpo, se è denso e poco esteso, o altrimenti dal suo centro di massa, ha un andamento parabolico.

La gittata è la distanza orizzontale tra il punto in cui viene lanciato un proiettile (con vettore velocità iniziale inclinato verso l'alto rispetto all'orizzontale) e il punto in cui esso ritorna al suolo.

Per studiare la gittata di un proiettile che si muove con moto parabolico (cioè sotto l'azione della sola forza peso e trascurando l'attrito con l'aria) si utilizzerà un sistema di riferimento cartesiano  $XY$  in cui l'origine  $O$  degli assi del sistema, coincida con il punto da cui il proiettile è stato lanciato.

Inoltre, si precisa che poiché il distacco della pala è un evento più probabile del distacco di un frammento di essa, essendo il punto di attacco al mozzo un potenziale punto critico, si procederà a una trattazione semplificata per il distacco dell'intera per operare a vantaggio di sicurezza mentre per il distacco dei frammenti della pala si procederà considerando la resistenza dell'aria.

## 2.2 EQUAZIONI DELLA CINEMATICA

Lo schema a cui si fa riferimento per la scrittura delle equazioni della cinematica è il seguente:

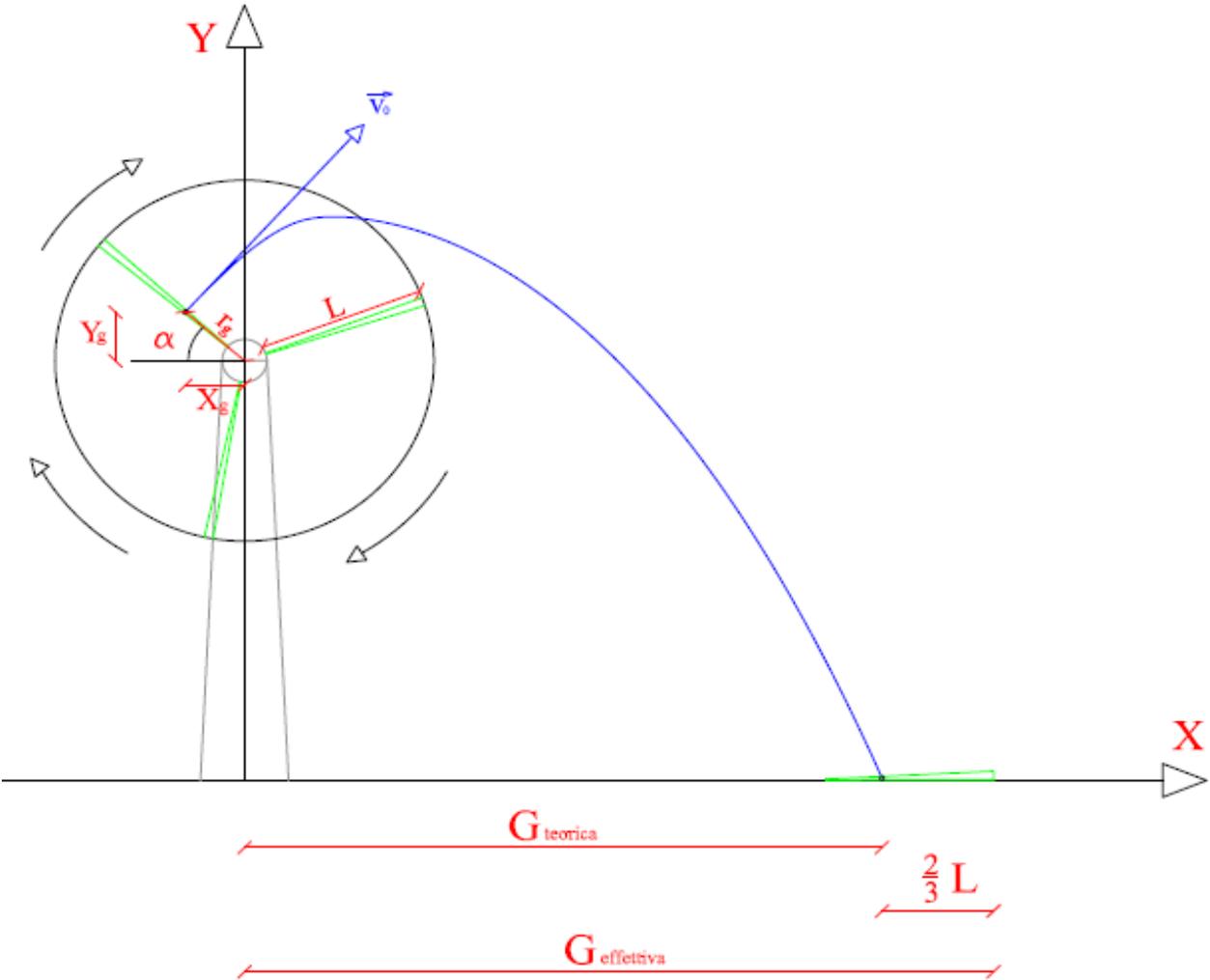


Figura 2: schema della gittata con un angolo compreso tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$

Considerando l'asse  $y$  orientata verso l'alto, le componenti del vettore accelerazione sono:

$$a_x = 0 \quad a_y = -g = -9,81 \text{ m/s}^2 \tag{1}$$

Indicando con  $v_0$  la velocità iniziale e  $\alpha$  l'inclinazione rispetto all'orizzontale, le componenti del vettore velocità sono:

$$v_x = v_0 \cos \alpha \quad v_y = v_0 \sin \alpha \tag{2}$$

Poiché il moto lungo  $x$  è rettilineo uniforme, valgono le seguenti leggi orarie:

$$v_x = v_{x,0} \tag{3}$$

$$x = x_0 + v_{x,0}t \tag{4}$$

Poiché il moto lungo  $y$  è uniformemente accelerato, valgono le seguenti leggi orarie:

$$v_y = gt + v_{y,0} \quad (5)$$

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y,0}t + y_0 \quad (6)$$

L'istante di tempo per il quale la pala tocca terra si ottiene imponendo nella (6)  $y$  pari a 0:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y,0}t + y_0 = 0 \quad (7)$$

L'altezza di lancio è data dalla somma tra l'altezza del mozzo e la distanza verticale del baricentro dal mozzo, come riportato nella figura precedente:

$$y_0 = H_g = H_{torre} + Y_g \quad (8)$$

$Y_g$  è nota grazie alla distanza del centro di massa dal mozzo  $r_g$ :

$$Y_g = r_g \cos \alpha \quad (9)$$

Si può risolvere la (7) rispetto a  $t$ :

$$t = \frac{-v_{y,0} \pm \sqrt{v_{y,0}^2 - 4\left(\frac{1}{2}gy_0\right)}}{g} \quad (10)$$

La (10) deve essere sostituita nella (4) per determinare la gittata  $x_G$ .

### 2.3 VELOCITA' PERIFERICA

La velocità angolare media  $\omega$  è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo.

Si indica con  $n$  il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare. Tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a  $2\pi$  rad, dopo  $n$  giri il corpo descrive in un minuto un angolo pari a  $2\pi n$  rad. Quindi, la velocità angolare è:

$$\omega = \frac{2\pi n \text{ rad}}{60 \text{ s}} \quad (11)$$

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il baricentro  $G$  percorre la circonferenza  $2\pi r$ ; dopo  $n$  giri al minuto lo spazio percorso sarà  $2\pi r n$  m/min.

Quindi, la velocità periferica del baricentro è:

$$v_0 = \frac{2\pi r n}{60} = \frac{2\pi \cdot 26,45 \cdot 12,1 \text{ m}}{60 \text{ s}} = 33,52 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

(12)

Se si volesse considerare l'effetto dell'attrito dell'aria, il valore della velocità del baricentro risulterebbe, secondo studi empirici, ridotta del 20% rispetto all'assenza di resistenze, divenendo pari a 26,81 m/s.

## 2.4 GITTATA PALA INTERA

L'equazione della gittata, in base a considerazioni precedentemente fatte, è:

$$x_G = \frac{v_{x,0} \left( v_{y,0} + \sqrt{v_{y,0}^2 + 2gH_g} \right)}{g} - X_g + \frac{2}{3}L$$

(13)

Al valore di gittata è stata sottratta la distanza  $X_g$  del baricentro rispetto all'asse della torre e aggiunta la distanza del vertice della pala dal baricentro. La distanza  $X_g$  è data da:

$$X_g = r_g \sin \alpha$$

(14)

L'equazione per il calcolo della gittata effettiva (1.13) è stata risolta per diversi valori di  $\alpha$ .

Si riportano i risultati ottenuti nella tabella seguente:

Angolo $\alpha$	n	L	$H_{\text{torre}}$	$v_0$	$v_{x,0}$	$v_{y,0}$	$H_g$	D	$r_g$	g	Gittata teorica	$X_g$	$L_g$	Gittata Effettiva
47	10.00	79.70	118.00	29.71	21.73	20.26	138.75	163	28.37	9.81	149.47	19.35	53.13	202.60
48	10.00	79.70	118.00	29.71	22.08	19.88	139.08	163	28.37	9.81	151.52	18.98	53.13	204.65
49	10.00	79.70	118.00	29.71	22.42	19.49	139.41	163	28.37	9.81	153.48	18.61	53.13	206.61
50	10.00	79.70	118.00	29.71	22.76	19.09	139.73	163	28.37	9.81	155.34	18.23	53.13	208.47
51	10.00	79.70	118.00	29.71	23.09	18.69	140.05	163	28.37	9.81	157.10	17.85	53.13	210.24
52	10.00	79.70	118.00	29.71	23.41	18.29	140.35	163	28.37	9.81	158.78	17.46	53.13	211.91
53	10.00	79.70	118.00	29.71	23.72	17.88	140.65	163	28.37	9.81	160.36	17.07	53.13	213.49
54	10.00	79.70	118.00	29.71	24.03	17.46	140.95	163	28.37	9.81	161.84	16.67	53.13	214.98
55	10.00	79.70	118.00	29.71	24.33	17.04	141.24	163	28.37	9.81	163.24	16.27	53.13	216.37
56	10.00	79.70	118.00	29.71	24.63	16.61	141.52	163	28.37	9.81	164.54	15.86	53.13	217.67
57	10.00	79.70	118.00	29.71	24.91	16.18	141.79	163	28.37	9.81	165.74	15.45	53.13	218.88
58	10.00	79.70	118.00	29.71	25.19	15.74	142.06	163	28.37	9.81	166.86	15.03	53.13	219.99
59	10.00	79.70	118.00	29.71	25.46	15.30	142.31	163	28.37	9.81	167.89	14.61	53.13	221.02
60	10.00	79.70	118.00	29.71	25.73	14.85	142.57	163	28.37	9.81	168.83	14.18	53.13	221.96
61	10.00	79.70	118.00	29.71	25.98	14.40	142.81	163	28.37	9.81	169.67	13.75	53.13	222.81
62	10.00	79.70	118.00	29.71	26.23	13.95	143.05	163	28.37	9.81	170.44	13.32	53.13	223.57
63	10.00	79.70	118.00	29.71	26.47	13.49	143.27	163	28.37	9.81	171.11	12.88	53.13	224.24
64	10.00	79.70	118.00	29.71	26.70	13.02	143.50	163	28.37	9.81	171.70	12.44	53.13	224.83
65	10.00	79.70	118.00	29.71	26.92	12.55	143.71	163	28.37	9.81	172.21	11.99	53.13	225.34
66	10.00	79.70	118.00	29.71	27.14	12.08	143.91	163	28.37	9.81	172.63	11.54	53.13	225.76
67	10.00	79.70	118.00	29.71	27.34	11.61	144.11	163	28.37	9.81	172.97	11.08	53.13	226.11
68	10.00	79.70	118.00	29.71	27.54	11.13	144.30	163	28.37	9.81	173.24	10.63	53.13	226.37
69	10.00	79.70	118.00	29.71	27.73	10.65	144.48	163	28.37	9.81	173.42	10.17	53.13	226.56
70	10.00	79.70	118.00	29.71	27.91	10.16	144.66	163	28.37	9.81	173.53	9.70	53.13	226.66
71	10.00	79.70	118.00	29.71	28.09	9.67	144.82	163	28.37	9.81	173.56	9.24	53.13	226.70
72	10.00	79.70	118.00	29.71	28.25	9.18	144.98	163	28.37	9.81	173.52	8.77	53.13	226.66
73	10.00	79.70	118.00	29.71	28.41	8.69	145.13	163	28.37	9.81	173.41	8.29	53.13	226.54
74	10.00	79.70	118.00	29.71	28.55	8.19	145.27	163	28.37	9.81	173.23	7.82	53.13	226.36
75	10.00	79.70	118.00	29.71	28.69	7.69	145.40	163	28.37	9.81	172.98	7.34	53.13	226.11

Tabella 2: valori della gittata al variare dell'angolo della pala rispetto all'orizzontale.

 <b>Loto Rinnovabili Srl</b> Largo Augusto n.3 20122 Milano pec:lotorinnovabili@legalmail.it	<b>STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI</b>		Cod. AS289-SI12-R
	Data Giugno 2023	Rev. 00	

Dall'analisi della gittata si ottiene che la massima distanza percorsa dal baricentro della pala è pari a 226,70 m e corrisponde a un angolo della pala rispetto all'orizzontale pari a 71°.

Si ricorda che il valore ottenuto, ricavato mediante il tool fornito dalla Regione Campania, è sufficientemente cautelativo nei confronti dei ricettori in virtù del modello teorico adottato.

## 2.5 GITTATA FRAMMENTI

In questo paragrafo è presentata la procedura di calcolo adottata per la valutazione della gittata dei frammenti di 10 m, 5 m, 2 m e 1 m mediante una procedura alle differenze finite. In funzione della lunghezza del frammento, si valuta la distanza del baricentro del frammento dal mozzo, la cui posizione può essere assunta a metà lunghezza dei frammenti, essendo elementi tozzi rispetto all'intera pala:

$$r_g = \frac{1}{2}L + (L_p - L) = L_p - \frac{1}{2}L \quad (15)$$

Grazie alla (15) possono essere valutate le componenti della velocità e le posizioni del baricentro all'istante 0 come fatto analogamente per l'intera pala.

Per il calcolo della gittata dei frammenti, si adotta il seguente sistema di riferimento:

- Asse x coincidente con la retta orizzontale passante per la base della torre e ortogonale all'asse di rotazione delle pale;
- Asse y coincidente con la retta orizzontale passante per la base della torre e parallelo all'asse di rotazione delle pale;
- Asse z coincidente con l'asse della torre.

La resistenza aerodinamica dovuta all'aria può essere scomposta secondo le sue componenti principali:

$$F_{xz} = -\frac{1}{2}C_D\rho S v_x^2 \quad F_y = -\frac{1}{2}C_D\rho S (w - v_y)^2 \quad (16)$$

Avendo indicato con:

- $C_D$  il coefficiente di resistenza aerodinamica assunto pari a 1,15 per la forma tozza del frammento;
- $\rho$  la densità dell'aria a 200 m s.l.m., assunta pari a 0,898 kg/m<sup>3</sup>;
- $S$  la superficie del frammento di pala ortogonale alla direzione del moto;
- $w$  è la velocità del vento, assunta pari a quella di cut off di 20 m/s.

Mediante l'applicazione del secondo principio della dinamica, è possibile scrivere tre equazioni per il calcolo delle componenti dell'accelerazione:

$$m \cdot a_x(t) = -F_{xz}(t) \cdot \cos \beta(t) \quad (18)$$

$$m \cdot a_y(t) = -F_y(t) \quad (19)$$

$$m \cdot a_z(t) = -F_{xz}(t) \cdot \sin \beta(t) - m \cdot g$$

(20)

Avendo indicato con:

- $\beta = \arctg \frac{v_z}{v_x}$ ;
- $m$  è la massa del frammento.

Note le componenti dell'accelerazione, possono essere valutate le componenti della velocità:

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + a_x(t) \cdot \Delta t$$

(21)

$$v_y(t + \Delta t) = v_y(t) + a_y(t) \cdot \Delta t$$

(22)

$$v_z(t + \Delta t) = v_z(t) + a_z(t) \cdot \Delta t$$

(23)

Infine, possono essere valutate le componenti dello spostamento:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v_x(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_x \cdot \Delta t^2$$

(24)

$$y(t + \Delta t) = y(t) + v_y(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_y \cdot \Delta t^2$$

(25)

$$z(t + \Delta t) = z(t) + v_z(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_z \cdot \Delta t^2$$

(26)

Tali equazioni possono essere integrate adottando un procedimento alle differenze finite con un passo di integrazione sufficientemente piccolo. È stato assunto un passo  $\Delta t$  pari a 0,001 s. La risoluzione delle precedenti equazioni consente di determinare il punto di coordinate  $(x_{max}, y_{max}, 0)$ . La gittata, quindi, nel sistema di riferimento cartesiano a tre assi, è valutabile nel modo seguente:

$$G = \sqrt{x_{max} + y_{max}}$$

(27)

A tale valore va sommata la distanza del vertice del frammento dal suo baricentro e va sottratta la distanza del baricentro dall'asse della torre, in virtù dell'ipotesi di aver considerato un angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale nell'intervallo  $[0^\circ, 90^\circ]$ .

Si riportano di seguito i valori di gittata ottenuti per i frammenti di 10 m, 5 m:

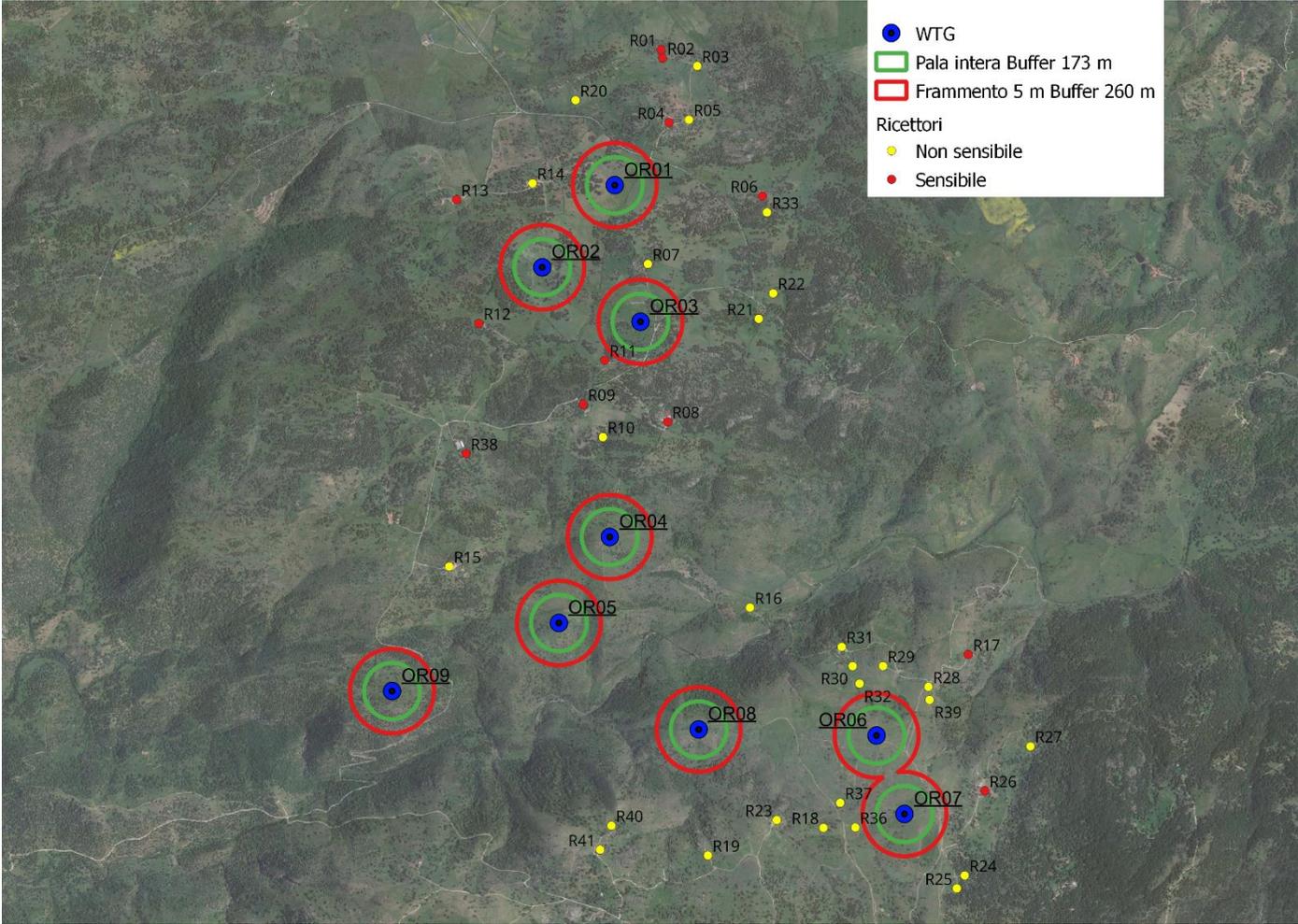
- Gittata frammento 10 m = 239,12 m;
- Gittata frammento 5 m = 258,61 m;

 <b>Loto Rinnovabili Srl</b> Largo Augusto n.3 20122 Milano pec:lotorinnovabili@legalmail.it	<b>STUDIO SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI</b>		Cod. AS289-SI12-R
	Data Giugno 2023	Rev. 00	

L'analisi sui ricettori sarà effettuata considerando il valore massimo di gittata ottenuto, ovvero quello riferito al frammento di 5 m, e quello riferito al caso di distacco della pala intera.

## 2.6 ANALISI DEI RICETTORI

L'analisi dei ricettori ha permesso di constatare che per quanto riguarda la gittata calcolata nell'ipotesi del distacco di pala intera non risulta esserci nessuna criticità con la presenza di ricettori potenzialmente sensibili e no come si può osservare nella figura di seguito riportata:



### 3 CONCLUSIONI

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

Dal momento che sono stati considerati per ciascun parametro valori ampiamente conservativi (massima velocità di rotazione, massima velocità del vento), il valore della gittata calcolato si può considerare ampiamente conservativo, pertanto da considerarsi come gittata massima.

Inoltre, non c'è presenza di ricettori potenzialmente sensibili che ricadano nei buffer di 173 e 260 m ricavato a seguito dell'ipotesi del distacco della pala intera e del frammento di 5 m.