

# PARCO EOLICO MONTE CERCHIO

Il Committente:  Windtek

Sede Legale: Corso Vercelli n. 10  
10152, Torino (TO)  
P.IVA e C.F. 12930940015

Oggetto:  
**RELAZIONE SPECIALISTICA**

Titolo:  
**RELAZIONE DI ANALISI DEGLI EFFETTI DI  
ROTTURA DI ORGANI ROTANTI**

Il Progettista



Ing. Silvio Mario Bauducco

Data	Emis.	Aggiornamento	Data	Contr.	Data	Autor.
07/2023	MB	Emissione	07/2023	MP	07/2023	SMB

SCALA: N.A.

FORMATO: A4

LUGLIO 2023

Commessa

Tip. impianto

Fase Progetto

Disciplina

Tip. Doc

Titolo

N. Elab

REV

22102

EO

DE

GN

R

07

0008

A

RICERCA, SVILUPPO E COORDINAMENTO IMPIANTI EOLICI E FOTOVOLTAICI A CURA DI:

  
**EMME CONSULTING** s.r.l.s.

Sede Amministrativa e Operativa  
via Benessia, 14 12100 Cuneo (CN)  
tel 335.6012098  
e-mail: emmecsrts@gmail.com

Geom. Domenico Bresciano

PROGETTAZIONE EDILE, AMBIENTALE, STRUTTURALE ED IMPIANTISTICA A CURA DI:

  
**BAUTEL** s.r.l.

Sede Amministrativa via Maroncelli, 23 10024 Moncalieri (TO)  
tel 011.6052113 - 011.6059915 e-mail: amministrazione@bautel.it  
Sede Operativa Torino - via Maroncelli, 23 10024 Moncalieri (TO)  
Sede Operativa Genova - via Banderali, 2/4 16121 Genova (GE)

I Tecnici:

Coord. gruppo di progettazione  
Ing. Silvio Mario Bauducco

Collaboratori

Geom. Benzoni Manuel  
Per. Ind. Biasin Emanuele  
Ing. Occhiuto Felice  
Arch. Ostino Paolo  
Arch. Pelleri Martina

File: testalini relazioni.dwg

<b>1. Premessa .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Introduzione.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Equazioni cinematiche .....</b>	<b>4</b>
3.1. Dati geometrici e cinematici degli aerogeneratori.....	4
3.2. Ipotesi di calcolo.....	5
3.3. Considerazioni sulle ipotesi di calcolo .....	6
3.4. Moto di un proiettile .....	6
3.5. Moto di una pala .....	8
<b>4. Risultati .....</b>	<b>11</b>
<b>5. Applicazione dello studio al progetto in esame .....</b>	<b>15</b>
<b>6. Conclusioni.....</b>	<b>16</b>

## 1. Premessa

Il presente progetto definitivo tratta la realizzazione di un parco eolico costituito da 7 aerogeneratori da 6.2 MW ciascuno, per una potenza totale pari a 43.4 MW. L'installazione degli aerogeneratori e' prevista nei comuni di CAIRO MONTENOTTE E SALICETO, rispettivamente in provincia di Savona e Cuneo.

La società che propone tale iniziativa, al fine di ricavare energia da fonti rinnovabili e all'insegna della transizione ecologia, è Windtek S.r.l., con sede legale Corso Vercelli n.10, 10152 - Torino (TO) - P.IVA e C.F. 12930940015.

## 2. Introduzione

Il presente report tratta la stima della gittata di una pala eolica nel caso di rottura della stessa. Tale situazione, seppur improbabile, è stata analizzata considerando ipotesi cautelative al fine di ottenere risultati conservativi, cioè i più pericolosi.

Nel dettaglio, la pala analizzata appartiene all'aerogeneratore prodotto dalla VESTAS (modello V162 – 6.2MW), con un'altezza da terra del mozzo (rotor HUB) pari a 122 m. Il punto di rottura è stato posto in prossimità dell'incastro delle pale con il rotor HUB, che coincide con il punto di maggiore sollecitazione meccanica dovuta, perlopiù, al momento flettente generato dalle forze aerodinamiche delle pale stesse.

Lo studio è stato condotto ipotizzando un angolo “di lancio” variabile, cioè considerando tutti gli angoli possibili di rottura della pala.

## 3. Equazioni cinematiche

Nel presente capitolo vengono riportati i dati geometrici e cinematici della pala, le ipotesi e i passaggi matematici necessari alla determinazione della legge del moto, e dunque alla gittata, nel caso di rottura della pala.

### 3.1. Dati geometrici e cinematici degli aerogeneratori

Gli aerogeneratori del campo eolico del progetto in esame, presentano i seguenti dati geometrici:

Diametro del rotore – $D$	162 m
Diametro del rotore HUB - $d$	4.65 m
Lunghezza della pala - $l$	79.2 m
Altezza da terra del rotore HUB - $H$	122 m

Tabella 1: Dati geometrici degli aerogeneratori

E i seguenti dati cinematici:

RPM del rotore – min	4.86
RPM del rotore – nom	8.83
RPM del rotore - MAX	12.1

Tabella 2: Dati cinematici degli aerogeneratori

### **3.2. Ipotesi di calcolo**

Le ipotesi che verranno eseguite di seguito saranno cautelative, come già introdotto nell'Introduzione (Capitolo 1); tale scelta condurrà a dei risultati conservativi rispetto al caso reale.

La prima ipotesi che viene effettuata è quella di distacco netto e istantaneo nel punto di incastro della pala al rotor HUB. Tale ipotesi risulta essere particolarmente conservativa in quanto il distacco di un'ala, come di ogni altro elemento meccanico, non avviene mai in maniera netta, bensì si ha una rottura che parte da un lembo (ad esempio bordo d'uscita del profilo alare) e si protrae lungo la sezione fino al lembo opposto (ad esempio bordo d'attacco del profilo alare) in un intervallo di tempo  $\Delta t$  diverso da 0. Al fine di considerare la resistenza che il materiale delle pale esplica durante la rottura (maggiore rispetto al carico critico) e la resistenza aerodinamica della pala durante il suo moto in aria (proporzionale al quadrato della velocità stessa), è possibile ipotizzare una riduzione della velocità tangenziale della pala pari al 30% nel momento della rottura. Inoltre, trascurando la resistenza aerodinamica della pala durante il moto, è possibile approssimare la pala ad un punto posizionato nel baricentro della pala stessa (sistema a 3 gradi di libertà (g.d.l.)); con buona approssimazione, è possibile considerare la posizione del baricentro della pala posto a circa 1/3 della stessa, dunque a una distanza  $R$  pari a  $R = d/2 + l/3 = 28.2m$  dal centro di rotazione.

Infine, la velocità di rotazione del rotore considerata sarà quella massima riportata dal costruttore (vedi Tabella 2).

Ricapitolando, le ipotesi effettuate sono le seguenti:

1. Distacco netto e istantaneo della pala nel punto di incastro;
2. Riduzione della velocità tangenziale della pala del 30%;
3. Sistema puntiforme con 3 g.d.l.
4. Concentrazione della massa della pala nel suo baricentro, posto a distanza  $R$  dal centro di rotazione;
5. Velocità di rotazione del rotore massima.

### 3.3. Considerazioni sulle ipotesi di calcolo

Generalizzando per un attimo il problema, dunque considerando la pala non come un sistema puntiforme, le equazioni del moto che ne determinano la relativa legge sono le seguenti:

$$\begin{cases} M \cdot a = F \\ I \frac{d\omega}{dt} = 0 \end{cases}$$

Equazione 1

Dove:

- $M$  è la massa;
- $a$  è l'accelerazione;
- $I$  è il momento d'inerzia;
- $\omega$  è la velocità angolare.

Le equazioni riportate nel sistema dell'Equazione 1, che risultano essere rispettivamente la prima e la seconda legge della dinamica, ci permettono di affermare che:

- Il corpo segue una traiettoria determinata dalla posizione del baricentro e dalle forze agenti sul corpo;
- Il corpo, durante la traiettoria precedentemente determinata, gira indisturbato intorno al suo asse principale d'inerzia con una velocità angolare pari a quella iniziale, non influenzando sulla traiettoria che esso compie.

Tali considerazioni sono state effettuate al fine di garantire la validità dell'approssimazione di sistema puntiforme a 3gdl precedentemente effettuata per il calcolo della gittata.

### 3.4. Moto di un proiettile

Grazie alle ipotesi effettuate nel Paragrafo 2.2, in particolar modo alla ipotesi di sistema puntiforme con 3 g.d.l., è possibile associare al problema in questione il

modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati con un angolo di alzo obliquo, con una velocità costante (a causa della mancanza della resistenza aerodinamica) e che compiono un moto noto con il termine: moto di un proiettile.

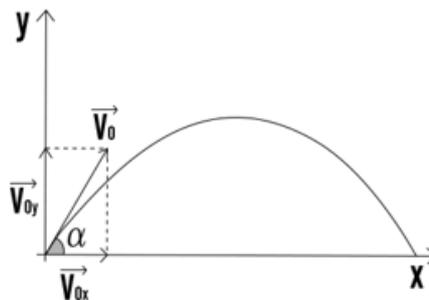


Figura 1

Il moto di un proiettile è dato dalla somma vettoriale di due differenti moti:

- Un moto longitudinale, lungo l'asse x, a velocità costante;
- Un moto trasversale, lungo l'asse z, uniformemente accelerato.

La combinazione di questi due moti fornisce un moto che nel piano X-Z presenta la caratteristica traiettoria parabolica come riportato in figura 1. La gittata è definita come la distanza che separa il punto di lancio del corpo (o proiettile, qualsivoglia) e il punto in cui esso tocca terra.

Considerando dunque un piano cartesiano X-Z ed origine O, è possibile scrivere le seguenti equazioni, che rappresentano le componenti delle accelerazioni lungo gli assi X e Z:

$$\begin{cases} \ddot{x} = 0 \\ \ddot{z} = -g \end{cases}$$

Equazione 2

Dove:

- $g$  è l'accelerazione di gravità, pari a circa  $9.81 \text{ m/s}^2$ .

Per quanto concerne le condizioni al contorno, il corpo è lanciato dall'origine degli assi con una velocità iniziale  $v_0$ , inclinata rispetto all'asse X di un angolo  $\theta$ , dunque con una componente lungo X e Lungo Z pari rispettivamente a:

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0 \cdot \cos\theta \\ v_{0z} = v_0 \cdot \sin\theta \end{cases}$$

Equazione 3

A questo punto, integrando l'Eq.2 ed applicando le condizioni al contorno, è possibile ottenere la legge del moto:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_{0x} \cdot t \\ z(t) = z_0 + v_{0z} \cdot t - 1/2gt^2 \end{cases}$$

Equazione 4

Ponendo  $z = 0$  nella seconda dell'Eq.4 e scartando la soluzione negativa, è possibile ricavare il tempo al quale il corpo tocca terra. Sostituendo il tempo così ottenuto nella prima dell'Eq.4 è infine possibile calcolare la gittata  $G$ . Nel dettaglio:

$$t|_{z=0} = \frac{v_{0z}}{g} + \frac{\sqrt{v_{0z}^2 + 2 \cdot g \cdot z_0}}{g}$$

Equazione 5

$$G = x_0 + v_{0x} \cdot t|_{z=0}$$

Equazione 6

### 3.5. Moto di una pala

Note le equazioni del moto di un proiettile, è possibile specificare il problema per il caso in esame:

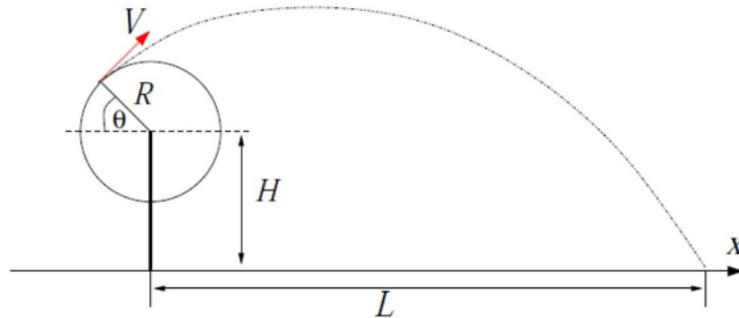


Figura 2

Facendo riferimento allo schema dell'aerogeneratore di Figura 2 e ponendo l'origine degli assi alla base dell'aerogeneratore, si ottengono le seguenti relazioni cinematiche del baricentro della pala prima della rottura della stessa:

$$\begin{aligned} x &= -R \cdot \cos(\omega t) \\ z &= H + R \cdot \sin(\omega t) \end{aligned}$$

Equazione 7

Dove:

- $R = d\sqrt{2} + l\sqrt{3}$  è la distanza del baricentro della pala dal centro di rotazione;
- $H$  è l'altezza del rotor HUB;
- $\omega$  è la velocità di rotazione.

Al fine di calcolare la velocità del baricentro della pala prima della rottura, è necessario derivare nel tempo l'Eq.7, ottenendo:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{d(x)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \\ v_z &= \frac{d(z)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \end{aligned}$$

Equazione 8

Imponendo il tempo di rottura  $t = \bar{t}$ , dunque  $\omega t = \omega \bar{t} = \theta$ , è possibile calcolare le condizioni iniziali, posizione e velocità, del moto della pala. Nel dettaglio, esse risultano essere eguali a:

$$\begin{aligned}
 x_0 &= -R \cdot \cos(\theta) \\
 z_0 &= H + R \cdot \sin(\theta) \\
 v_{x_0} &= \frac{d(x)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \sin(\theta) \\
 v_{z_0} &= \frac{d(z)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \cos(\theta)
 \end{aligned}$$

Equazione 9

Sostituendo le condizioni iniziali ottenute nell'Eq.5, è possibile calcolare il tempo di volo della pala, cioè il tempo che intercorre tra il momento della rottura  $\bar{t}$  e il momento in cui tocca terra. Nel dettaglio, risulta essere pari a:

$$t|_{z=0} = \frac{R \cdot \omega \cdot \cos(\theta)}{g} + \frac{\sqrt{R^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2(\theta) + 2 \cdot g(H + R \cdot \sin\theta)}}{g}$$

Equazione 10

Infine, sostituendo  $t|_{z=0}$  ricavato nell'Eq.10, all'interno della prima nell'Eq.4, si ricava la gittata della pala  $G$ :

$$G = -R \cos(\theta) + R \omega \sin(\theta) \cdot \frac{1}{g} \left[ R \omega \cos(\theta) + \sqrt{R^2 \omega^2 \cos^2 \theta + 2g(H + R \sin(\theta))} \right]$$

Equazione 11

L'Equazione 11 ci permette, note le caratteristiche geometriche ( $R$ ,  $H$ ) e cinematiche ( $\omega$ ) dell'aerogeneratore di calcolare la gittata della pala. È importante notare che la gittata  $G$  è funzione dell'angolo  $\theta$  che la pala presenta nel momento della rottura. Al fine di determinare quale sia l'angolo  $\theta$  per il quale la gitta  $G$  è massima, si procede con il calcolo dei massimi e dei minimi ponendo a 0 la derivata della gittata rispetto all'angolo  $\theta$ ; cioè:

$$\frac{d(G)}{d\theta} = 0$$

Equazione 12

Che porta al seguente risultato:

$$\frac{\omega R \cos(\theta)(2gH + 3gR \sin(\theta) - \omega^2 R^2 \sin^2(\theta) + \omega^2 R^2 \cos^2(\theta))}{2\sqrt{\omega^2 R^2 \cos^2(\theta) + 2g(H + R \sin(\theta))}} + \sin(\theta) \left( R - \frac{\omega^2 R^2 \sin(\theta)}{g} \right) + \frac{\omega^2 R^2 \cos^2(\theta)}{g} = 0$$

Equazione 13

#### 4. Risultati

Sostituendo i dati a nostra disposizione, riportati nel paragrafo 2.1, nella Equazione 13, è possibile ottenere i seguenti risultati:

$\Theta   G_{\max} =$	65°	per $\Theta$ positivi
$\Theta   G_{\max} =$	305°	per $\Theta$ negativi

Sostituendo gli angoli così ottenuti nella Equazione 11, si ottengono le gittate massime sia per i  $\Theta$  positivi che per i  $\Theta$  negativi:

$G_{\max} ( \Theta   G_{\max} = 65^\circ )$	= 222.16m
$G_{\max} ( \Theta   G_{\max} = 305^\circ )$	= -222.03m

Per completezza si riporta la tabella in cui sono presenti i dati ricavati dalla seguente analisi:

$\Theta$ - gradi	$\Theta$ - radianti	Seno di $\Theta$	Coseno di $\Theta$	Gittata (m)
0	0	0	1	-28.2
5	0.087266463	0.087155743	0.996194698	2.4991209
10	0.174532925	0.173648178	0.984807753	33.02133377
15	0.261799388	0.258819045	0.965925826	62.73789199
20	0.34906585	0.342020143	0.939692621	91.05583151
25	0.436332313	0.422618262	0.906307787	117.4365981
30	0.523598776	0.5	0.866025404	141.4125194
35	0.610865238	0.573576436	0.819152044	162.6005055
40	0.698131701	0.64278761	0.766044443	180.712417
45	0.785398163	0.707106781	0.707106781	195.5616213

50	0.872664626	0.766044443	0.64278761	207.0653609
55	0.959931089	0.819152044	0.573576436	215.2427013
60	1.047197551	0.866025404	0.5	220.2080125
65	1.134464014	0.906307787	0.422618262	222.1601793
70	1.221730476	0.939692621	0.342020143	221.3680297
75	1.308996939	0.965925826	0.258819045	218.1528017
80	1.396263402	0.984807753	0.173648178	212.8687997
85	1.483529864	0.996194698	0.087155743	205.883647
90	1.570796327	1	6.12574E-17	197.559662
95	1.658062789	0.996194698	-0.087155743	188.237789
100	1.745329252	0.984807753	-0.173648178	178.2251913
105	1.832595715	0.965925826	-0.258819045	167.7871132
110	1.919862177	0.939692621	-0.342020143	157.1430365
115	2.00712864	0.906307787	-0.422618262	146.4666324
120	2.094395102	0.866025404	-0.5	135.8886527
125	2.181661565	0.819152044	-0.573576436	125.5017535
130	2.268928028	0.766044443	-0.64278761	115.3662872
135	2.35619449	0.707106781	-0.707106781	105.5162785
140	2.443460953	0.64278761	-0.766044443	95.96502869
145	2.530727415	0.573576436	-0.819152044	86.71002199
150	2.617993878	0.5	-0.866025404	77.7369924
155	2.705260341	0.422618262	-0.906307787	69.02314031
160	2.792526803	0.342020143	-0.939692621	60.53956611
165	2.879793266	0.258819045	-0.965925826	52.25302595
170	2.967059728	0.173648178	-0.984807753	44.12712537
175	3.054326191	0.087155743	-0.996194698	36.12306004
180	3.141592654	1.22515E-16	-1	28.2
185	3.228859116	-0.087155743	-0.996194698	20.31519822
190	3.316125579	-0.173648178	-0.984807753	12.4238917
195	3.403392041	-0.258819045	-0.965925826	4.479054778
200	3.490658504	-0.342020143	-0.939692621	-3.568936716
205	3.577924967	-0.422618262	-0.906307787	-11.77266452
210	3.665191429	-0.5	-0.866025404	-20.18796405
215	3.752457892	-0.573576436	-0.819152044	-28.87403621
220	3.839724354	-0.64278761	-0.766044443	-37.89319834
225	3.926990817	-0.707106781	-0.707106781	-47.31001945
230	4.01425728	-0.766044443	-0.64278761	-57.18948546
235	4.101523742	-0.819152044	-0.573576436	-67.59373077
240	4.188790205	-0.866025404	-0.5	-78.57678614
245	4.276056667	-0.906307787	-0.422618262	-90.17679398
250	4.36332313	-0.939692621	-0.342020143	-102.405331
255	4.450589593	-0.965925826	-0.258819045	-115.2339696

260	4.537856055	-0.984807753	-0.173648178	-128.5790671
265	4.625122518	-0.996194698	-0.087155743	-142.2868923
270	4.71238898	-1	-1.83772E-16	-156.1222233
275	4.799655443	-0.996194698	0.087155743	-169.763918
280	4.886921906	-0.984807753	0.173648178	-182.81019
285	4.974188368	-0.965925826	0.258819045	-194.7944463
290	5.061454831	-0.939692621	0.342020143	-205.2101963
295	5.148721293	-0.906307787	0.422618262	-213.5416809
300	5.235987756	-0.866025404	0.5	-219.2961459
305	5.323254219	-0.819152044	0.573576436	-222.0341005
310	5.410520681	-0.766044443	0.64278761	-221.3950015
315	5.497787144	-0.707106781	0.707106781	-217.1170072
320	5.585053606	-0.64278761	0.766044443	-209.0503998
325	5.672320069	-0.573576436	0.819152044	-197.1648703
330	5.759586532	-0.5	0.866025404	-181.5511566
335	5.846852994	-0.422618262	0.906307787	-162.4176406
340	5.934119457	-0.342020143	0.939692621	-140.0825297
345	6.021385919	-0.258819045	0.965925826	-114.9622445
350	6.108652382	-0.173648178	0.984807753	-87.55663125
355	6.195918845	-0.087155743	0.996194698	-58.43162458
360	6.283185307	-2.4503E-16	1	-28.2

Tabella 1: calcoli di gittata

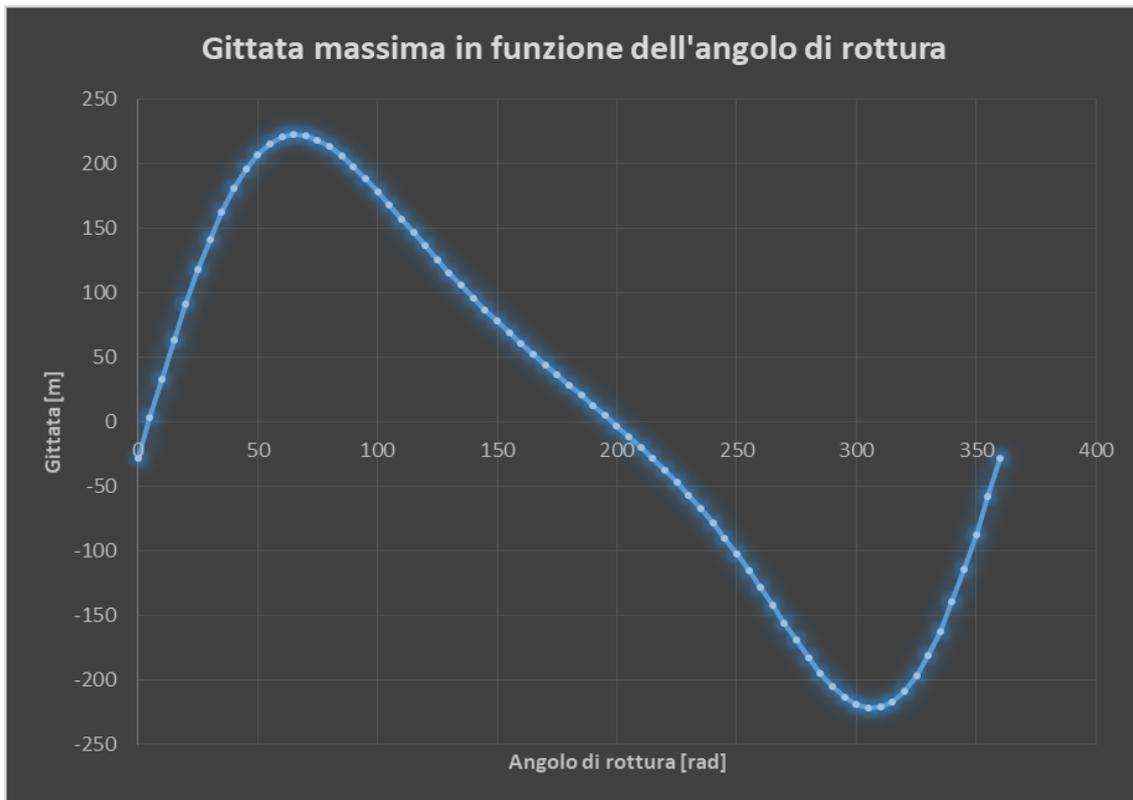


Figura 3

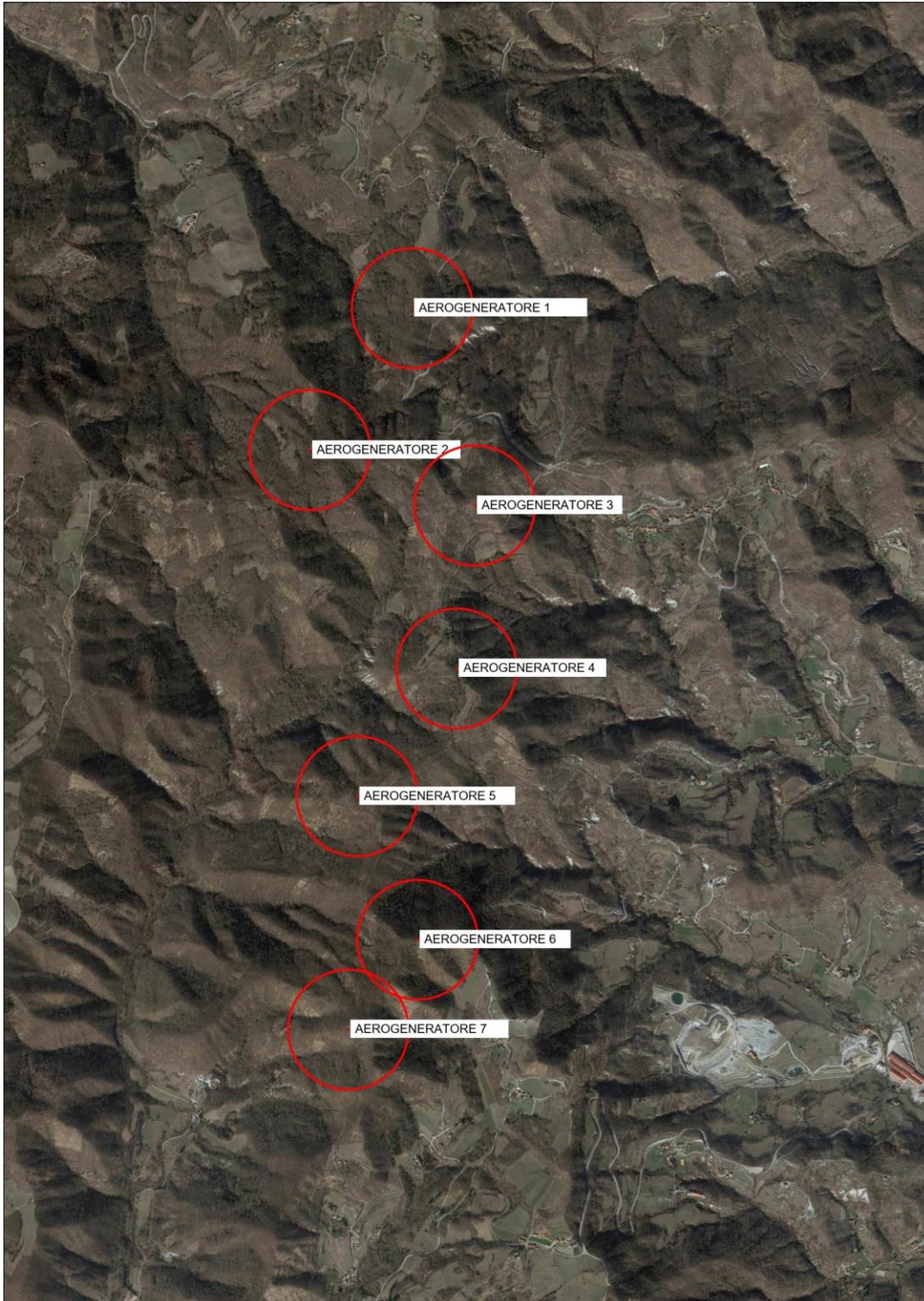
Si ricorda che i valori della gittata presentati sono stati determinati effettuando una riduzione del 30% della velocità della pala nel momento della rottura, al fine di tener conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza che si generano al momento della rottura.

Noti i valori di gittata massimi, il cui modulo coincide, date le caratteristiche geometriche della pala, presentate precedentemente, è possibile calcolare il punto in cui cade l'estremità della pala stessa.

Prendendo in considerazione l'ipotesi più pericolosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con il l'estremità alare nella direzione del moto, dunque con la parte più lontana del baricentro verso l'esterno, si ottiene:

$$\text{Punto massima caduta} = G_{MAX} + 2/3 l = 274.80m$$

## 5. Applicazione dello studio al progetto in esame



Nel caso dell'impianto eolico del progetto in esame è possibile rilevare che gli aerogeneratori sono collocati ad una distanza tale da risultare sempre superiore al

valore della gittata che al valore di ribaltamento dell'intera pala, pari a circa 275 m, e distanti da:

- Strade statali;
- Strade ad elevato scorrimento;
- Abitazioni di carattere rilevante.

## 6. Conclusioni

Dai risultati riportati nel seguente report è possibile dedurre che la progettazione dell'impianto eolico ha tenuto in debita considerazione i rischi derivanti dall'eventualità, seppure remota, della rottura di una pala.

I risultati riportano che la gittata massima raggiunta dalla pala in caso di rottura in prossimità del mozzo corrisponde a **275 metri**. Tali valori sono stati ottenuti considerando una riduzione della velocità periferica del 30 %, al fine di considerare le forze resistenti del materiale e dell'attrito dell'aria.

La distanza minima degli aerogeneratori del progetto da eventuali ricettori risulta essere in ogni caso maggiori rispetto ai valori della gittata. È dunque possibile concludere che nell'ipotesi di rottura di una pala di un aerogeneratore si è in completa sicurezza.

Si tende a sottolineare come il calcolo di gittata di frammenti o porzioni di guscio della pala, risulta essere privo di basi computazionali, in quanto la determinazione delle dimensioni del reale pezzo di ala che si possa distaccare è del tutto aleatorio e non dipende da una causa specifica riconducibili ad una discontinuità, un difetto di progettazione o di realizzazione della pala. Al fine di oltrepassare questo problema si potrebbe condurre un'analisi del rischio che è un indice funzione della probabilità di occorrenza di una specifica rottura e la gravità delle sue conseguenze. L'attuazione di questa analisi sarebbe possibile soltanto se tutte le informazioni riguardanti questo tipo di eventi fossero disponibili e se la popolazione statistica, cioè il numero di eventi di cui si hanno questo tipo di informazioni, sia notevolmente ampia, cosa che non è verificata nella realtà.

Dalle analisi effettuate è possibile dedurre che il fenomeno di rottura degli organi rotanti di un aerogeneratore risulta altamente improbabile e che per effetto degli agenti atmosferici, la fulminazione accidentale, è possibile ritrovare frammenti di pala, solitamente di piccole dimensioni, a non più di 40-50 metri dalla base della

stessa. Inoltre, secondo lo studio della DEWI OCC le percentuali di guasti annuali degli aerogeneratori, relativi alla rottura delle pale e/o a parti di esse, hanno una probabilità di verificarsi pari a  $4.2 \cdot 10^{-4}$ ; tale valore risulta essere particolarmente cautelativo: infatti, lo studio statistico è stato condotto su un parco eolico con installazioni molto datate, anche prima del 1984, e considera le innumerevoli rotture causate dalle fulminazioni, dunque di lieve entità e bassissima pericolosità. Inoltre, negli ultimi decenni, i metodi di progettazione e costruzioni, nonché la qualità dei materiali, sono notevolmente migliorati e rispondono a riconosciuti standard internazionali. Pertanto, la possibilità di rottura delle pale e/o di parte di esse è da ritenersi altamente improbabile e dunque i risultati a cui si è giunti sono altamente cautelativi.